PAUL F. SCHURMANN

LUZ Y CALOR

Historia y filosofía de la Ciencia

ESPASA-CALPE ARGENTINA S.A.
BUENOS AIRES - MÉXICO

PAUL F. SCHURMANN

LUZ Y CALOR

25 SIGLOS DE HIPÓTESIS ACERCA DE SU NATURALEZA

ESPASA - CALPE ARGENTINA, S. A.
BUENOS AIRES - MÉXICO

Edición especialmente autorizada por el autor

Queda hecho el depósito dispuesto por la ley Nº 11723

Copyright by Cía. Editora Espasa-Calpe Argentina, S. A.
Buenos Aires, 1946

IMPRESO EN ARGENTINA

PRINTED IN ARGENTINE

Acabado de imprimir el 25 de noviembre de 1946

Gerónimo J. Pesce y Cía. — Pedro Goyena 1562/68. — Buenos Aires

ÍNDICE GENERAL

LIBRO I

EL MISTERIO DE LA LUZ

EVOLUCIÓN DE LA TEORÍA DE LA NATURALEZA DE LA LUZ

CAPÍTULO I

A MANERA DE PRÓLOGO

		Pág.
1.	Historia de la Ciencia e Historia de la Física	13
2.	La Física Nueva	16

CAPÍTULO II

EL ENIGMA DE LA LUZ

ASPECTO GENERAL Y ALGUNOS ANTECEDENTES

LAS TEORÍAS DE LA LUZ

1.	Cuadro esquemático de su evolución	24
2.	Antes del siglo XVII	27

CAPÍTULO III
LA LUCHA SE INICIA

1er. EPISODIO: VICTORIA DEL CORPÚSCULO

		Pág.
1.	La luz en el Siglo XVII:	
	Galileo — Vossio — Keplero — Gassendi	34
	Descartes	36
	Fermat — Grimaldi — Hooke — Roemer	44
	Huyghens y Newton	49
2.	El Siglo XVIII:	
	Juan II Bernoulli y Euler	64

CAPÍTULO IV
LA LUCHA SE REANUDA

2º EPISODIO: DESQUITE DE LAS ONDAS

LA CUESTIÓN DE LAS INTERFERENCIAS

1.	Siglo XIX. Las ondulaciones:	
	Young — Wollaston	67
	Malus — Biot — Brewster	71
	Fresnel — Arago — Neumann	73

CAPÍTULO V
UNA NUEVA POLÍTICA

3er. EPISODIO: EL PLAN MAXWELL

1.	Teoría Electromagnética:	
	Faraday — Maxwell	84
2.	Lorentz y el electrón	91
3.	Hacia la Física Nueva	95

CAPÍTULO VI
UN NUEVO ORDEN

4º EPISODIO: LA FÍSICA NUEVA

Pág.

MÁS ADELANTE... DENTRO DEL MISTERIO

1. Efecto fotoeléctrico 98
2. El fotón 103
3. Teoría de los Cuanta 106
4. Continuidad, discontinuidad 110
5. Bohr — Sommerfeld 114
6. Efecto Compton 122
7. Los dos caminos 123
8. Mecánica Ondulatoria. — El príncipe de Broglie 126
9. Davisson y Germer. — Efecto Raman 133
10. Mecánica Cuántica. — Heisenberg 135
11. Digresión. — Un nuevo estado de espíritu 136
12. Indeterminismo, Estadística, Libre albedrío 142
13. La Síntesis esperada 153
14. El «Spin» 155
15. El fotón renovado 159

LIBRO II
EL CALOR
EL NACIMIENTO DE LA TERMODINÁMICA

CAPÍTULO VII
EL CALOR

GENERALIDADES

1. Luz y Calor 163
2. El Calor:
   Naturaleza — Conductibilidad — Termodinámica ... 166

CAPÍTULO VIII

TERMODINÁMICA

Pág.

1. Los dos principios 172
2. El Primer Principio:
   Mayer — Joule 173
3. Una vida:
   Julius Robertus Mayer 185
4. El Segundo Principio:
   Sadi Carnot — Clausius 193
5. La misteriosa entropía 196

CAPÍTULO IX

LA ENERGÉTICA

1. Materia y Energía:
   Física y Metafísica 202
2. Energética y Mecanismo:
   Rankine — Mach 207
3. Ostwald. La «derrota» del atomismo 211
4. El nuevo mecanismo 224

BIBLIOGRAFÍA 227

ÍNDICE ALFABÉTICO DE AUTORES CITADOS 231

LIBRO I

EL MISTERIO DE LA LUZ

EVOLUCIÓN DE LAS TEORÍAS DE LA NATURALEZA DE LA LUZ

CAPÍTULO I

A MANERA DE PRÓLOGO

1

HISTORIA DE LA CIENCIA E HISTORIA DE LA FÍSICA

Tiene un extraordinario atractivo para quien se interese en la *Historia de la Ciencia,* el poder tratar aisladamente un grupo determinado de fenómenos desde el punto de vista histórico, o sea poder seguir paso a paso a través del tiempo —y en este caso particular a través de muchos siglos— la evolución de los conceptos emitidos acerca de un solo capítulo de una ciencia, sean éstos conceptos emitidos o rechazados en el momento en que fueron presentados.

Estos conceptos parecen, a veces, desarrollarse lógicamente por un proceso evolutivo que infunde optimismo y confianza en la marcha certera e indiscutible del progreso científico; pero, otras veces se modifican tan fundamentalmente, se vuelven tan contradictorios o inconexos entre sí, que nuestro optimismo y nuestra confianza tranquila arriesgan tornarse en pavor, escepticismo y desaliento.

Las teorías acerca de la naturaleza de la luz constituyen tal vez el ejemplo más hermoso de esas extraordinarias evoluciones de la ciencia, y son prueba evidente del poderoso atractivo del estudio histórico parcial de un grupo determinado de fenómenos.

Pero, sin darnos cuenta de ello, estas palabras iniciales nos han enfrentado de inmediato con el tema mismo que

nos proponemos desarrollar y que, en el curso de este trabajo, llamaremos «nuestro tema». Por tentadora que sea esta solución expeditiva, no debemos adoptarla y entrar así de lleno en «nuestro tema» o sea a tratar la evolución de las teorías de la luz, sin dedicar algunos instantes a expresar, aunque sea en estilo casi telegráfico, ciertas generalidades acerca de la Historia de la Ciencia y, particularmente, de la Historia de la Física.

La *Historia de la Ciencia* es una disciplina de reciente creación, pese a los antecedentes que de ella existen en los antiguos y particularmente en ARISTÓTELES y TEOFRASTO (siglo IV a. de J. C.). Tal como la concebimos, su más lejano origen certero se encuentra en la obra de AUGUSTE COMTE a mediados del siglo XIX, y PAUL TANNERY le dió magnífico desarrollo; pero sólo en este siglo XX y especialmente desde la fundación de la «Academia Internacional de Historia de Ciencia», en 1928, se observó, en Europa, la iniciación de un movimiento general e intenso a favor del estudio de la historia de la ciencia y a favor de su introducción en la enseñanza media y superior.

Confieso que es para mí una gran satisfacción poder declarar que inicié mis estudios de historia de la física, me dediqué por completo a ellos y defendí el derecho de la historia de la ciencia a ser introducida en la enseñanza (1), con varios años de anterioridad a este reciente despertar del movimiento europeo a favor de tan hermoso estudio. Confieso además y con profundo desagrado, que proseguí mis estudios durante varios años completamente ajeno al magnífico despertar que ya se hacía evidente en Europa.

El más grave inconveniente para la rápida difusión de esa noble y fecunda disciplina, cuyos valores educativos no han sido aún debidamente aprovechados, era —y es todavía— la falta de obras sintéticas que ofrezcan una amplia visión de la *Historia de la Ciencia*, creencia que se debe sin duda, a su vez, a la falta de obras analíticas de la historia de las distintas ciencias.

(1) P. F. SCHURMANN. *La Enseñanza de la Historia de la Ciencia.* (Montevideo, 1931).

En estos últimos años, sin embargo, historiadores como G. SARTON, ABEL REY, P. BRUNET, ALDO MIELI... han publicado obras de extraordinario valor, que, dentro de su carácter de obras de especialización, anuncian el pronto advenimiento de compendios al alcance de todos y, particularmente de la juventud estudiosa.

La historia de la física no escapa a la deficiencia bibliográfica de toda la historia de la ciencia, y, cuando me inicié en su estudio, hace de esto más de treinta años, no encontré otros puntos de referencia sino las obras de HOEFER (1872), de POGGENDORFF (1878) y de PITONI (1913). Con una base tan insuficiente, me ví obligado a prescindir de las obras sintéticas y a recurrir a las obras originales, a colecciones de revistas científicas, a informes de academias y otros trabajos y publicaciones dispersos. Después de muchos años, terminada ya la redacción de una obra propia (1), aparecieron, en 1928, la obra importante de HOPPE, de difícil acceso para el lector no especializado y alejado de las fuentes bibliográficas europeas, y, en 1934, el pequeño compendio de KISTNER, que no reúne por cierto las condiciones sintéticas que deben exigirse de un texto tan extraordinariamente condensado.

Si despreciamos las regiones inexploradas de la ciencia primitiva, podemos iniciar la historia de la física con TALES DE MILETO 600 años antes de JESUCRISTO, y si envolvemos en un solo vistazo los 25 siglos transcurridos, distinguimos claramente dos períodos, tan destacados, uno del otro, como si tuvieran coloraciones diferentes o estuvieran ubicados en distintos niveles:

El primero, que abarca 22 siglos, es toda la época anterior a GALILEO o sea anterior al método experimental (sin que, con esa demarcación, pretendamos concentrar en GALILEO solo el mérito exclusivo de la creación del empirismo científico).

Este primer período comprende: Proveniente de las raíces ocultas de la ciencia primitiva, *la Ciencia Helénica*, con

(1) P. F. SCHURMANN. *Historia de la Física*. 2 volúmenes. 2ª edición. (Buenos Aires, 1946, Edit. Nova). 1ª edición, Montevideo, 1936.

sus épocas griega, alejandrina y grecorromana, que abarca un conjunto de 1000 años. Luego, tras un período de decadencia y de transición, tres siglos de *Ciencia Arabe*, seguidos por el *Resurgimiento Occidental*.

El segundo período es la era de la física experimental, empírica, clásica, sensorial. Comprende tres siglos de abundancia, en los cuales se distinguen por características propias, tres épocas: de GALILEO a NEWTON, de NEWTON al siglo XIX y el siglo XIX. En todo ese período moderno se estableció y afirmó en la ciencia un conjunto conceptual y metodológico, basado en el racionalismo, el materialismo y el «mecanicismo», con una fe profunda y secularmente arraigada en la causalidad y el determinismo.

2

LA FÍSICA NUEVA

La iniciación del siglo XX nos plantea un grave problema histórico, una incógnita que, con prudencia de historiador, no nos atrevemos a resolver por falta de «perspectiva». No haré pues una afirmación sino una pregunta. ¿Inaugura este siglo XX, el tercer período, una era nueva: la de la física simbólica, formal o epistemológica, cuyo punto de partida puede encontrarse en la teoría de los cuanta de PLANCK, o sea —por una extraña coincidencia cronológica— exactamente en el año 1900?

Debemos detenernos algunos instantes ante este problema, pues está íntimamente ligado con el estudio histórico de la evolución de las teorías de la luz.

Sería, sin duda, arriesgado afirmar categóricamente y sin esperar el fallo del tiempo, que ese 1900, tan cercano aun a nosotros aunque separado ya por muchos acontecimientos y una evidente evolución de los métodos y del espíritu científico, marca una fecha de transición de igual trascendencia para la historia de la física que el establecimiento del método experimental a fines del siglo XVI. Significaría esto, atribuir a la teoría de los cuanta de

PLANCK, a la teoría de la relatividad de EINSTEIN y a las consecuencias y derivaciones de ambas en la física de los cuatro últimos decenios, una importancia tal que decretaría la inauguración de una «Física Nueva». Sería afirmar, por consiguiente, que no estamos frente a una crisis pasajera, ni a un simple sobresalto de la evolución de la física, sino ante una modificación duradera y profunda, ante uno de los grandes codos de la evolución de dicha ciencia y de la ciencia en general.

Si no estamos magnificando la importancia de teorías recientes, si no nos ha deslumbrado con la audacia de su originalidad, debemos reconocer que esta Física Nueva es fundamentalmente distinta de la Física Clásica que aun enseñamos en las aulas; y debemos admitir que nos impone modificaciones de concepto mucho mayores aun que las que impusiera el método experimental a los peripatéticos o escolásticos de la Edad Media.

Y es prueba de ello nuestra extrañeza, nuestra desorientación, nuestra desesperación cada vez que nosotros, formados en los conceptos de la física clásica, abandonamos sus anchos y firmes caminos para elevarnos a la estratosfera de la física nueva, hacia esas alturas donde frecuentemente nos falta el piso, donde nos sentimos desamparados, perdidos en el vacío, llevados en la frágil y arriesgada navecilla de teorías recientes y muy imperfectas aún, pese a su asombrosa fecundidad, probada con maravillosos descubrimientos.

A esa distancia, parecen esfumarse los edificios de la física clásica, que durante tres siglos se mantuvieron inconmovibles: las obras de GALILEO el experimental, KEPLERO el universal, DESCARTES el racional, BACON el feliz disertador del «experimentum crucis», LEIBNIZ y NEWTON con la Matemática Nueva, NEWTON con los «Principios», la causalidad y las fuerzas antropomórficas de la mecánica clásica, el siglo XVIII con el análisis matemático y los flúidos imponderables, el XIX con el ideal de unificación, con el mecanismo tan sencillo que hoy parece ingenuo, con los conceptos sobre el valor de teorías e hipótesis, expuestos por DUHEM, MACH o POINCARÉ... Se esfuman los caminos firmes y claros de los conceptos de nuestros sentidos.

Antes de la aparición de esta física nueva, con criterio de historiador, podríamos haber hablado así de la Física, sin vacilación alguna: «La historia de la Ciencia muestra cómo la inteligencia y el conocimiento humanos, dirigidos por una inteligencia incipiente, se inclinaron primero hacia técnicas utilitarias, evidente resultado de observación y experiencia pero que, por su limitado alcance, no pueden merecer el nombre de ciencia, pese a que ésta haya encontrado en dichas técnicas un innegable origen.

Vimos en Grecia, que, con el nacimiento de una Cultura original, surgió una ciencia con tendencia típicamente especulativa, desprendida de la observación y, más aun, de la experiencia metódica. Recién pudo observarse en ARISTÓTELES, TEOFRASTO y ESTRATÓN DE LÁMPSACO el primer esfuerzo hacia la observación y la sistematización en las ciencias naturales. Pero la Física, tal como fué concebida en el período cultural moderno de Europa Occidental, es decir desde el Renacimiento y GALILEO, es una ciencia esencialmente experimental y de generalización. Si dejara de reunir ambas condiciones, la Física dejaría de subsistir. En efecto, toda observación que en ella se haga y todo principio o ley que en ella se emita tienen como fin o como fundamento una experiencia real o hipotética. Por otra parte, sólo consideramos valioso y real un conocimiento, cuando podemos generalizarlo y cuando su generalización no tenga límites ni restricciones ni en el tiempo, ni en el espacio».

Así podríamos haber hablado, pero vino la física nueva... EINSTEIN, con la relatividad, nos mostró que nuestros postulados más evidentes sólo rigen entre estrechos límites de magnitudes medias, al alcance de nuestros sentidos, y que deben ser corregidos para magnitudes mayores o menores, de astros, o de electrones.

La mayoría de los fenómenos de esos mundos están fueran del alcance de nuestra observación directa y de nuestra experimentación, por perfectos que sean los medios con los cuales ampliamos el alcance de nuestra percepción sensorial. Debemos imaginar métodos distintos de la simple observación que, si bien pueden tener características de Metafísica, por estar más alla de la Física corriente, no pueden ser asimilados a aquélla por estar íntimamente ligados

a los procedimientos y conceptos de ésta. Estos nuevos medios de adquisición, no pudiendo ser de observación directa, son generalmente apriorísticos y nos son dados por la Epistemología.

La física nueva, llena de símbolos matemáticos sensorialmente inalcanzables, exige que renunciemos al proceso seguido en física clásica, que consistía en utilizar los sentidos como intermediarios indispensables entre el mundo exterior, mundo material en cuya realidad creemos sin entrar jamás en contacto directo con él y nuestro mundo interior, nuestro cerebro, intérprete y ordenador de los informes a veces confusos y engañosos que le proporcionan los sentidos.

El método epistemológico nuevo renuncia aparentemente a la investigación de ese mundo exterior y objetivo, limita su campo de exploración a lo que esté en nuestro conocimiento humano; pero al mismo tiempo extiende su acción a zonas experimentalmente inobservables. Es la ciencia de lo más sutil.

¡Qué difícil es someternos a esas exigencias de la física nueva! Las partes más elevadas y nobles de nuestro espíritu nos ordenan sumisión y obediencia, acatamiento y respeto ante la demostración matemática de la exactitud indiscutible de esos cálculos formales, ante la perfecta coincidencia de sus resultados con hechos de reciente descubrimiento, y ante su poder, superior al de la física clásica, para hacer descubrir hechos reales nuevos e insospechados. Ante todo eso, o a pesar de todo eso, las partes más vulgares de nuestro espíritu, lo que estamos acostumbrados a llamar nuestro «buen sentido», ese buen sentido «burgués» que sólo cree en un ingenuo realismo, en lo que ve, en lo que toca, o —lo que es lo mismo— en lo que pueda ser representado por un mecanismo material, se horroriza ante lo paradojal de «conceptos inconcebibles», «inimaginables» y, más aun, «inexpresables», porque no tienen ni representación material, ni expresión verbal posibles. El buen sentido burgués se horroriza y se rebela, y desea ardientemente despertar de esta «pesadilla», ver derribado este «castillo de naipes», aceptando a regañadientes que se conserven como único recuerdo de esos «ardides arti-

ficiosos», aquellos de sus descubrimientos que sean: reales, conceptuales y útiles, y nos dejen volver a nuestra buena, firme y segura física clásica, sensorial y experimental.

Esa rebelión, ¡qué bien la vemos en BOUASSE, el irascible profesor de Toulouse!, cuando rehusa admitir las ecuaciones de desconocido origen propuestas por esos «*mathématiciens camouflés*»; cuando se aferra a los conceptos de espacio, de tiempo, etc.,... porque, de otro modo, «*todo se va al diablo*»; cuando dice que esos «*cuentos para lectores de diarios*» no intimidan a los físicos que «*conocen física y su historia tan bien o mejor que esos innovadores...*»; o cuando dice violencias mayores que prefiero no repetir aquí... Y, sin embargo, cuando BOUASSE se exaltaba así contra los fantasmas de la teoría cuántica de PLANCK o de la relatividad de EINSTEIN, aun no habían surgido hipótesis, teorías y doctrinas mucho más revolucionarias aun, ante las cuales PLANCK y EINSTEIN, precisamente, ahora oponen palabras de prudencia y expresan su esperanza en explicaciones racionales y claras, que salven la validez aproximada de la ciencia consagrada, sin renunciar a sus maravillosas conquistas, tanto experimentales y prácticas como teóricas y conceptuales.

Más que las violencias o impaciencias, nos impresionan, en verdad, los consejos de prudencia de los defensores de la física clásica, que esperan encontrar en ella misma la explicación de todos los fenómenos, aunque, hasta el momento, algunos de los hechos sólo concuerdan con los cálculos de la física nueva.

Y entre esos consejos de prudencia, deseo recordar aquí a dos sabios, no ha mucho desaparecidos. Fué PAINLEVÉ (1863-1932) quien, tres días antes de su muerte, proclamó su fe en las doctrinas clásicas y en la próxima inclusión de lo relativo en lo absoluto de NEWTON y de LAGRANGE. Y fué MEYERSON, el filósofo y el matemático de los cuanta, quien, también poco antes de su muerte (1934), proclamó que «*la actitud de la física moderna no es más que un expediente inevitable, un «acaso», un «pis aller» y un «renunciamiento doloroso»*. Aseguró, en fin, que el físico del porvenir encontrará el significado

de todos los conceptos que encierra el cálculo matemático, y volverá presuroso a una imagen del universo, concreta y perfectamente realizable en el pensamiento.

Otros sabios, mientras tanto, manifiestan, como JEANS, que son cada vez menos numerosos los físicos que esperan ver restaurados los antiguos principios como la misma ley de causalidad.

El trascurso del tiempo da, sin duda, la razón a la opinión expresada por JEANS. Muchos de los conceptos que, hace veinte años, nos parecían anárquicos y descabellados y acerca de cuya efimeridad no abrigábamos la menor duda, hoy están perfectamente afirmados en la ciencia y convenientemente articulados con la ciencia clásica anterior, cuyo dominio y poder han sido circunscritos dentro de fronteras precisas. Nuestro espíritu mismo ha evolucionado paulatinamente hacia capacidades de intuición y de comprensión que nos liberan poco a poco de arraigados prejuicios. Es evidente pues una rápida evolución de carácter epistemológico.

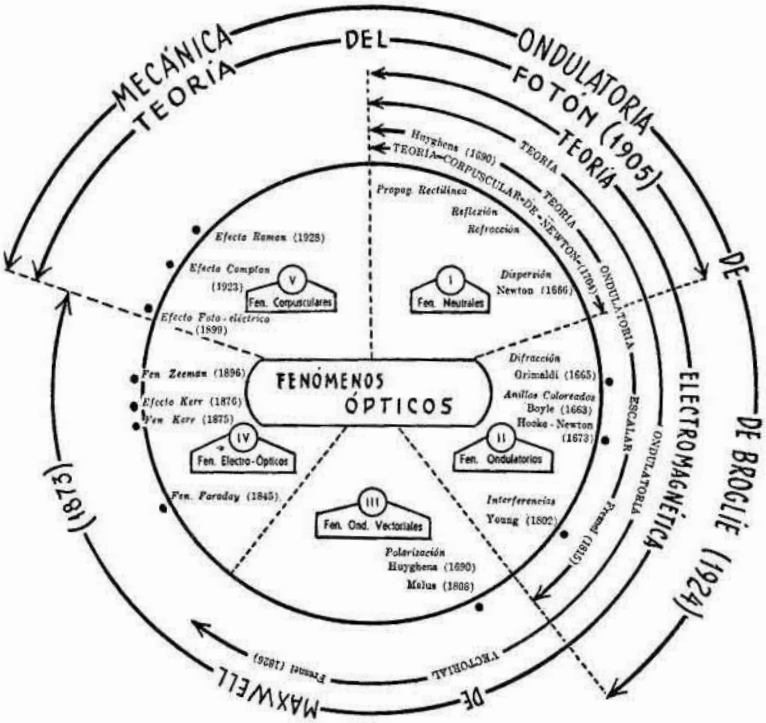
Estamos libres de conservar nuestra esperanza en el triunfo final de la física clásica debidamente renovada y ampliada en serena evolución, tanto por los nuevos descubrimientos como por los nuevos conceptos; pero no podemos eludir el deber de seguir el movimiento actual, aun en sus más atrevidas y efímeras hipótesis, y aunque esa física formal nos exija abandonar —tal vez sólo momentáneamente—, nuestras convicciones que se han vuelto prejuicios, nuestras herramientas de labor que se han vuelto estorbos y hasta nuestro buen sentido, ese buen y razonable burgués... ¡Quiera Dios que, al hacerlo, no caigamos en el ridículo de Mr. Jourdain, el burgués que quiso ser gentilhombre, en la obra de Molière que, más que a comedia, nos sabe a tragedia!

Y ya que viene al caso, contestaré aquí a quienes, como mi distinguido prefacista y respetado amigo el ingeniero García de Zúñiga, me reprocharon no haber traspasado el límite de 1900 en mi *Historia de la Física:* «No lo he hecho, porque no me atreví a resolver el problema histórico que acabo de plantear, y no me atreví a ello porque

la misma condición de historiador con su sentido de responsabilidad y su escepticismo frente al presente fugaz, se asemeja, tal vez..., a la de ese burgués timorato que teme elevarse a la estratosfera y teme, más aun, servir de guía para otros, en tan arriesgado viaje».

Sin embargo, en este estudio de la evolución de las teorías de la naturaleza de la luz, me veré obligado a presentar una síntesis de uno de los aspectos más interesantes de la magnífica y tan compleja labor teórica y experimental de los físicos del siglo XX. Frecuentemente estusiasmado por su maravillosa osadía, por el libre vuelo de sus especulaciones, que recuerdan en belleza las hazañas espirituales de los filósofos griegos, además de superarlas en conocimiento, método y material científicos, historiaré sus admirables exploraciones en los misterios más ocultos del universo, recordando un pensamiento de Alfredo de Vigny que podría haber sido escrito especialmente para esta ocurrencia:

«*Lorsqu'un siècle est en marche guidé par une pensée, il est semblable à une armée marchant dans le désert. Malheur aux traînards! Rester en arrière c'est mourir.*»


MECÁNICA ONDULATORIA
TEORÍA DEL FOTÓN (1905) TEORÍA DE
DE MAXWELL (1873) DE BROGLIE (1924)
ELECTROMAGNÉTICA
Huygens (1690)
TEORÍA CORPUSCULAR DE NEWTON (1704)
TEORÍA ONDULATORIA
Propag. Rectilínea
Reflexión
Refracción
Efecto Raman (1928)
Efecto Compton (1923)
V
Fen. Corpusculares
Efecto Foto-eléctrico (1899)
I
Fen. Neutrales
Dispersión Newton (1666)
Fen. Zeeman (1896)
Efecto Kerr (1876)
Fen. Kerr (1875)
FENÓMENOS ÓPTICOS
Difracción Grimaldi (1665)
Anillos Coloreados Boyle (1663) Hooke - Newton (1673)
IV
Fen. Electro-Ópticos
II
Fen. Ondulatorios
Fen. Faraday (1845)
III
Fen. Ond. Vectoriales
Interferencias Young (1802)
Polarización Huygens (1690) Malus (1808)
Fresnel (1818)
ESCALAR
ONDULATORIA
TRANSVERSAL
Fresnel (1826)

CAPÍTULO II

EL ENIGMA DE LA LUZ

ASPECTO GENERAL Y ALGUNOS ANTECEDENTES

LAS TEORÍAS DE LA LUZ

1

CUADRO ESQUEMÁTICO DE SU EVOLUCIÓN

La historia de las teorías de la luz —y volvemos al tema de nuestra preocupación, a «nuestro tema»— es la historia de la lucha secular de dos conceptos antagónicos: el concepto corpuscular y el concepto ondulatorio.

Ningún capítulo de la Física nos ofrece mejor que el problema de la naturaleza de la luz, un cuadro amplio de la evolución de un número reducido de conceptos fundamentales, que dan nacimiento a toda una floración de teorías distintas, elaboradas por medio de hipótesis originales y leyes nuevas, fortalecidas con sorprendentes descubrimientos experimentales. Cada una de esas teorías, aunque arraigada en alguno de los viejos conceptos, dió con su nueva savia, floraciones de cautivante color y perfume. Purísimas creaciones de la ciencia, imágenes genui-

namente científicas, apreciamos sus valores intrínsecos como teorías en mucho más que su relación concreta con una realidad tangible, cuya accesibilidad, o cuya misma existencia, es asunto de discusión filosófica.

Ninguna historia de teorías científicas, en fin, puede señalar mejor que esta historia de las teorías de la naturaleza de la luz, grandes etapas del pensamiento científico.

Y sería pecar de infundado escepticismo llegar a la conclusión de que la lucha de conceptos, que se perpetúa sin que se defina victoria definitiva a favor de una u otra tendencia, es prueba de la fertilidad de la ciencia en su afán por descubrir los secretos de la naturaleza. Muy al contrario, en el transcurso de los incidentes de esa lucha, y debido a esos incidentes, fueron descubiertas importantísimas e insospechadas propiedades de la luz, incrementándose así notablemente nuestros conocimientos concretos de óptica.

Tal vez la representación de los dos conceptos como fuerzas antagónicas debiera ser considerada imagen inadecuada si provocara deducciones tan erróneas; sería mejor, quizás, considerar que los defensores de uno y otro concepto forman ejércitos aliados, de los cuales cada uno tiene su táctica propia y desea imponerla para la dirección conjunta de las operaciones; pero mientras tanto, los dos ejércitos avanzan triunfantes en su gran empresa de descubrimientos y de conquistas.

Es una lucha... la única contienda enaltecedora de la humanidad; sus victorias no tienen ni vencidos, ni víctimas; sus armas son las ideas, su botín: la verdad.

La física nueva, con la mecánica de los cuanta y la mecánica ondulatoria, propone conceptos nuevos que pretenden epilogar, en forma hasta cierto punto conciliatoria, esa prolongada lucha, y que anhelan edificar la ansiada *teoría completa de la luz.*

Debemos detenernos un instante ante esta expresión de «teoría completa de la luz», pues exige una aclaración, aclaración que dará lugar a que establezcamos ya ahora el plan general de la evolución de las teorías de la luz, centro y eje de este estudio, y en cuyo derredor estamos girando, impulsados por divagaciones un tanto centrífugas.

Las teorías físicas no son, como las especulaciones metafísicas, vuelos libres en las regiones infinitas del pensamiento; deben mantenerse en constante comunicación con los hechos reales de la entidad física que pretende «explicar, clasificar o generalizar». Aun cuando aparentan desligarse momentáneamente de su base terrenal, no olvidan jamás que su vuelo tiene por fin verdadero alcanzar un objetivo real.

En otras palabras, el físico puede y debe sentirse, a veces, filósofo o poeta, y alejarse de la materia o, mejor dicho, del fenómeno físico, pero, mientras el poeta y el filósofo regresan con pensamientos e ideales, el físico vuelve con un descubrimiento o con un invento bajo el brazo.

Y esos progresos definitivamente adquiridos, que se suman a los hechos reales anteriores, imponen frecuentemente rectificaciones fundamentales de las teorías. En ninguna parte mejor que en las teorías de la luz, observaremos cómo los fenómenos nuevos se rebelan contra las mismas teorías que provocaron su descubrimiento. Veremos así fenómenos de «psicología» especial. Hay «*fenómenos neutrales*», vacilantes o sumisos, que, como la propagación rectilínea, la reflexión, la refracción, se adaptan a cualquier concepto acerca de la naturaleza de la luz. Hay «*fenómenos rebeldes*» que imponen ya el cambio de un concepto por otro (como las interferencias y la difracción), ya la modificación de un concepto determinado (como la polarización), ya la creación de conceptos nuevos (como los fenómenos electro-ópticos y foto-eléctricos).

El cuadro que os presento aquí (inspirado por un esquema similar, aunque de disposición distinta, que pertenece a LUIS DE BROGLIE), nos permitirá seguir estas constantes imposiciones de los hechos reales sobre las doctrinas teóricas. Nos permitirá observar el continuo empeño de esas teorías en lograr contemplar el conjunto siempre creciente de los fenómenos ópticos, con un afán que recuerda en algo a las conferencias diplomáticas europeas que se suceden sin cesar en su esfuerzo por conciliar los intereses nacionales siempre crecientes, siempre dispares... cuando no disparatados.

Fijaos bien en el cuadro y volved a mirarlo repetidas veces en el curso de vuestra lectura de las páginas siguientes como si fuera el claro itinerario de nuestro viaje. Sólo así descubriréis cuan elocuente es, dentro de su gráfico mutismo. Aunque su división en cinco sectores, de todos los fenómenos ópticos conocidos hasta el presente, no fué motivada por una finalidad de ordenación histórica cronológica, observad cómo el círculo que pretende contener esos fenómenos podría asemejarse a la esfera de un reloj, y cómo se ubicaron de por sí, en su circunferencia, en perfecta correlación cronológica, las fechas de los principales descubrimientos ópticos, como las horas y los minutos de una esfera de reloj.

Fijaos también cómo esa disposición circular (que tiene el inconveniente de aparentar contener en un círculo definitivamente cerrado fenómenos que, en realidad, esperan la aparición de otros descubrimientos y hasta de nuevos grandes sectores), tiene la ventaja de juntar los dos sectores extremos: los viejos «fenómenos neutrales» con los «fenómenos corpusculares» modernos, estableciendo, con su posición de extremidades del recorrido circular, el contacto entre NEWTON y EINSTEIN, entre el corpúsculo de las emisiones y el fotón moderno. Y entre esos «extremos», así se ubica el reinado de las ondulaciones.

Ahora, con este cuadro a la vista, con su laconismo que no incita a divagaciones, con sus círculos, sectores y llaves que imponen orden y método, iniciemos nuestro rápido viaje a través de la historia de la óptica.

2

ANTES DEL SIGLO XVIII

En la sintética visión que aquí ofrecemos, de 25 siglos de evolución de las teorías de la naturaleza de la luz o del calor, debemos, como ocurre en toda obra figurativa, adoptar una cierta «perspectiva».

En algunas obras históricas se logra representar, una

tras otra, las distintas épocas, dando a cada una de ellas una extensión exactamente proporcional a su tiempo de duración o a la importancia de los acontecimientos acaecidos.

El historiador, en este caso, renuncia a todo punto de mira actual y personal, tanto en el tiempo, como en el espacio, y se transporta de una época a otra, de un lugar a otro, con absoluta prescindencia de su propia persona y posición.

Algo de esto pretendemos hacer aquí, aunque, por tratarse de problemas de palpitante actualidad, no podemos olvidar jamás nuestro mirador personal y establecemos así, involuntariamente, una perspectiva natural con la cual las teorías modernas aparecen con mayor extensión que las del siglo pasado, disminuyendo gradualmente si no la apreciación del valor conjunto, la magnitud y la minuciosidad de la exposición, a medida que remontamos el curso de los siglos.

Cualquiera sea, sin embargo, la posición adoptada, no sería exagerado afirmar que la lucha entre el concepto corpuscular y el concepto ondulatorio no empieza a revestir interés real, desde el punto de vista científico, sino a fines del siglo XVII. Desde el punto de vista histórico, sin embargo, sería una grave omisión callar algunas manifestaciones anteriores de conceptos titubeantes y confusos que pueden ser considerados como las nebulosas engendradoras de las teorías modernas.

En todo el período anterior al siglo XVII, el descubrimiento de fenómenos ópticos y el invento de aparatos fueron mucho más fecundos que la elaboración de hipótesis acerca de la naturaleza de la luz.

Los informes acerca de los conocimientos ópticos en la antigüedad son poco frecuentes, vagos y mal documentados, y permiten más bien hacer suposiciones que afirmaciones concretas.

Podemos suponer que el conocimiento empírico de la *propagación rectilínea de la luz* y aun de su *reflexión* y de su *refracción* —los tres *fenómenos neutrales*— debe remontar a los más lejanos orígenes del humano saber, pues ningún fenómeno físico puede alcanzar el primordial

interés suscitado por la luz, primer intermediario entre el mundo exterior y el mundo interior.

Es prueba de este lejano origen de los conocimientos elementales de óptica, el hecho de que los babilonios conocían perspectiva 4000 años antes de J. C.; y 2000 años más tarde hacían observaciones de eclipses, mientras que los egipcios calculaban la altura de las pirámides por la longitud de su sombra.

En la alta antigüedad, la noción del rayo de luz rectilíneo se confundía totalmente con la noción de la recta y, mientras la primera dió nacimiento a la Óptica, la segunda engendró la Geometría.

La observación de la reflexión en la superficie de las aguas tiene la misma edad del hombre; la Biblia menciona los espejos y se encuentran espejos metálicos en las tumbas egipcias.

El fenómeno de refracción que nos da la ilusión de que una vara se quiebra al ser introducida oblícuamente en el agua, debe también haber sido observado en época remota; y el poder de aumento de un vaso de agua y aun de lentes de vidrio fué conocido en la alta antigüedad a pesar de una absoluta carencia de explicación de esos efectos de la refracción.

Los griegos estudiaron científicamente la Óptica Geométrica que comprendía: la Óptica (o estudio de la vista), la Catóptrica (estudio de la reflexión), la Eskenografía (estudio de la perspectiva) y la Dióptrica (estudio de los ángulos por medio de la alidada). Pero todo lo que corresponda a la naturaleza íntima de la luz consistía en especulaciones filosóficas comprendidas dentro del problema de la visión, pues, como lo dice CORNÚ: «*Los antiguos filósofos no descubrieron la complejidad de lo que se llama la luz; confundían bajo la misma denominación lo que es personal al hombre y lo que le es exterior*».

Esas especulaciones, que no merecen el nombre de teorías, pueden ser asimiladas a tres tipos:

La especulación del primer tipo, cuya más antigua exposición conocida se atribuye a PITÁGORAS y fué admitida por la mayoría de los filósofos de la antigüedad, prolon-

gándose su éxito durante toda la Edad Media, consideraba que los rayos visuales emanan del ojo, se propagan en línea recta y chocan con el cuerpo observado, siendo la visión la consecuencia de ese choque. Como esos rayos son divergentes, a cierta distancia del ojo se vuelve apreciable el espacio que los separa unos de otros, lo que explicaría que, a gran distancia, los objetos pequeños pueden escapar a la acción visual.

EUCLIDES, que compartía ese criterio como también lo compartía el mismo PTOLEMEO, incluía en dicha explicación la de la naturaleza misma de la luz, pues asimilaba los rayos solares a rayos visuales con idénticas propiedades.

El segundo tipo de especulaciones pertenece a los estoicos y consiste en atribuir al órgano central del alma la emanación de una respiración, que sale por la pupila como una presión, y adquiere al expandirse en el espacio, la forma de un cono. Esta respiración necesita que la influencia solar (la luz), rarifique el aire, pues éste se opone a su propagación.

El tercer tipo de esas especulaciones suele ser llamado «teoría epicúrea» y fué sostenido, entre otros, por EMPÉDOCLES, LEUCIPO, DEMÓCRITO, EPICURO y LUCRECIO. Según esta explicación, los cuerpos desprenden átomos que llevan su imagen por el espacio hasta fijarla en nuestros ojos, de igual modo que átomos de otro tipo impresionan nuestro olfato. Cuando el viaje por el espacio se prolonga, la imagen se debilita y se deforma debido a la resistencia del aire, lo que explica la disminución de la intensidad luminosa con la distancia, así como las aberraciones ópticas. Si no fuera por esta resistencia del aire, «*podríamos distinguir una mosca prendida en la bóveda del cielo*». Esos átomos al chocar en la dura superficie de un espejo se comprimen tanto que «*se dan vuelta*», y con esto queda explicada la reflexión con la inversión de la imagen.

Es éste, al fin y al cabo, un concepto corpuscular, y ofrece, sobre las explicaciones anteriores, la ventaja de considerar la visión como una «inmisión» y no una «emisión».

PLATÓN, que conocía las leyes de catóptrica: propagación rectilínea de la luz, igualdad de los ángulos de inci-

dencia y de reflexión y ubicación de los rayos incidente y reflejado en un plano perpendicular a la superficie del espejo, buscó una solución conciliatoria: la luz del sol o la emanación luminosa de los cuerpos se propagan en forma rectilínea, y su encuentro en el espacio con la parte más sutil del fuego, que emana de nuestras pupilas, produce una «equivalencia» y así la sensación de visión. En la reflexión, ese encuentro tiene lugar en la superficie reflectora, no siendo posible el encuentro si esta superficie no es perfectamente lisa.

—«*¿Y los colores?*», pregunta MENÓN a SÓCRATES; y PLATÓN hace decir al maestro:

—«*Los cuerpos tienen emanaciones que pasan por los poros y algunas emanaciones son proporcionadas a ciertos poros, pero son demasiado grandes o pequeños para otros. Sentado esto, comprende lo que digo: El color no es otra cosa que una emanación de las figuras proporcionada a la vista y sensible*».

MENÓN pretende comprender y contesta: «*Esa respuesta, Sócrates, me parece perfectamente bella...*»

Y el maestro responde: «*Ella tiene no sé qué de trágico, Menón, y por esta causa te agrada tanto...*»

De esas respuestas «*perfectamente bellas*» que tienen «*no sé qué de trágico*», las encontraremos también nosotros en la física nueva...

En la extensa obra de ARISTÓTELES se encuentran algunas afirmaciones claras o ingenuas como las siguientes: Debe existir, entre el objeto y el ojo, un intermediario que llamaremos «*el transparente*», pues en un vacío absoluto no veríamos nada. Pero este intermediario sólo actúa cuando está iluminado por el fuego o el éter. El fuego no emana del ojo, como creen algunos, pues si así fuera veríamos en la obscuridad.

Francamente, deducir de esas afirmaciones que ARISTÓTELES fué el precursor directo de la teoría de las ondulaciones de la luz, como lo hacen muchos historiadores, es demostrar una buena voluntad sin límites hacia los antiguos o una perspicacia sobrehumana. Por otra parte, ARISTÓTELES, infiel a sus propias ideas, recurrió frecuentemente a la hipótesis de la emisión de rayos visuales, como

siguieron haciéndolo, durante muchos siglos, los filósofos y los físicos para quienes la visión, confundida con la luz, siguió siendo «*una proyección del alma hacia el mundo exterior*».

Los árabes, que demostraron preferencia por la óptica geométrica, debido a sus relaciones con las matemáticas, nada nuevo hicieron en cuanto a los conceptos acerca de la naturaleza de la luz, ni aun de la visión. Y el único hecho digno de mención es que, en el siglo XI, AL HAZEN, cuyas obras constituyeron conjuntamente con las de PTOLEMEO toda la óptica de la Edad Media, defendió claramente el concepto de la inmisión y atribuía a cada punto del objeto visible la emisión de una infinidad de rayos, de modo que cada punto se vuelva el vértice de una pirámide o de un cono luminoso cuya base es la pupila.

Y la óptica siguió haciendo progresos, a base de observaciones e inventos, con BOLLSTAEDT, con ROGERIO BACON, VITELO y PECKHAM, en el siglo XIII, con TEODORICO en el XIV, con LEONARDO DE VINCI en el XV, MORÓLICO y PORTA en el XVI.

VINCI parece haber expresado con mayor claridad que otros la hipótesis ondulatoria de la luz, y leemos en *Libri*: «*El parece haber observado por vez primera los movimientos regulares del polvo colocado en superficies elásticas en vibración. Una observación más importante y completa es la de las ondas circulares que parecen cruzarse en la superficie del agua. Leonardo no creía en el sistema de la emisión para la luz. Consideraba que el sonido y la luz se propagan de la misma manera.*»

Pese a ello podemos afirmar que hasta el siglo XVII, no nos ofrece la historia novedades conceptuales de verdadera cuantía acerca de la naturaleza de la luz.

CAPÍTULO III

LA LUCHA SE INICIA

1er. EPISODIO: VICTORIA DEL CORPÚSCULO

I

LA LUZ EN EL SIGLO XVII

Y llegamos al siglo XVII, época en que, como lo dijimos antes, se inicia la verdadera lucha entre el concepto corpuscular y el concepto ondulatorio, o, por lo menos, el momento en que ambos preparan las armas para ese singular torneo.

El siglo XVII fué muy fecundo para la historia de la óptica: se inició con los trabajos de KEPLERO sobre la refracción, la reflexión total y la fotometría; LIPPERSHEY inventó el anteojo que GALILEO perfeccionó, JANSSEN inventó el microscopio; SNELLIUS y DESCARTES descubrieron, casi simultáneamente, la ley de la refracción; DESCARTES explicó la formación del arco iris; GREGORY inventó el telescopio; GRIMALDI estudió la defracción y observó las interferencias; NEWTON estudió la dispersión y los anillos coloreados; ROEMER midió la velocidad de la Luz; KIRCHER perfeccionó la linterna mágica; HOOKE inventó la cámara clara... En todos esos estudios predominaba el interés por el rayo luminoso y su trayectoria geométrica, tanto en el espacio libre, como a través de los accidentes provocados por su encuentro con una superficie o por su penetración en un nuevo ambiente. Pero, con el estudio del

mecanismo interno de las ondas, a las cuales HUYGHENS atribuyó la constitución última de la luz, este punto de vista esencialmente lineal y geométrico se modificó completamente.

Recordemos una vez más, a fin de evitar nuevas digresiones interesantes, pero dilatorias, que, de la abundante producción de estudios de óptica del siglo XVII, sólo nos corresponde destacar aquí lo que esté directamente relacionado con los conceptos acerca de la naturaleza de la luz.

Galileo — Vossio — Keplero — Gassendi

GALILEO (1564-1642), genial creador de la Dinámica y fecundo animador del método experimental, concibió la luz como movimiento de un medio determinado y, asimilándola así a un problema cinético, pretendió dilucidarlo con sólo establecer el valor de la velocidad de ese movimiento. Fiel al método con el cual dió nuevo impulso a las investigaciones y al mismo espíritu científico, imaginó y propuso la experiencia que permitiera medir esa velocidad. Su lógica era perfecta: Se colocan, a buena distancia uno del otro, dos observadores provistos, cada uno, de una linterna encendida, cuya luz se oculta por medio de una pantalla. El primer observador retira bruscamente la pantalla y, en el preciso instante en que el otro experimentador recibe la luz así liberada, éste repite el mismo acto. De tal manera, el tiempo que demora el primer observador en percibir esa luz debe corresponder al tiempo invertido por ella en recorrer el doble de la distancia entre ambos experimentadores. No sin razón, en verdad, se extrañan muchos comentaristas modernos de que no se le ocurriera a GALILEO que la intervención del segundo observador, con su linterna y su pantalla, podía ser completamente eludida, reemplazándose simplemente por un espejo, que hubiera realizado la misma tarea, automáticamente y sin demora, exactamente como lo hiciera FIZEAU, dos siglos y medio más tarde.

Sabiendo, como lo sabemos ahora nosotros, cuán enorme es la velocidad de la luz y, por consiguiente cuán im-

posible sería poder percibir, con nuestros torpes sentidos, el tiempo de duración infinitesimal en que la luz recorre una breve distancia terrenal y sabiendo además cuán enorme y perturbadora, con relación a ese cortísimo tiempo, sería la simple demora con que los lentos movimientos musculares del hombre debieran regular la emisión de la señal de recepción, la experiencia de GALILEO nos parece infantil e ingenua, y nos hacen sonreír los vanos empeños de los miembros de la célebre Academia del Cimento en lograr realizarla, pese a repetidos fracasos. No pocos hombres de ciencia encontraron en esas infructuosas tentativas la clarísima y categórica ratificación de su creencia en la propagación instantánea de la luz. Sin embargo, aun cuando ya se conoció, por procedimientos astronómicos, cuán enorme es la velocidad de la luz y, por consiguiente, cuán vana era la esperanza de GALILEO y sus émulos del Cimento, no se abandonó por ello el deseo y la esperanza de medirla en pequeñas distancias terrestres; y FIZEAU lo consiguió, a mediados del siglo XIX, con sólo perfeccionar el instrumental de la experiencia de GALILEO.

VOSSIO (1618 - 1689), hombre de ciencia holandés, particularmente célebre por haber hecho conocer la ley de la refracción descubierta por SNELLIUS, estampó, en el año 1662, en su obra titulada *Sobre la Naturaleza de la Luz*, afirmaciones categóricas según las cuales la luz no es un cuerpo como se creía, no es materia en sí, pero que, sin embargo, es una realidad física, igual que el sonido. Pero la luz se diferencia de éste por el hecho de que subsiste en el vacío propagándose en él en forma invisible e instantánea, para volver a hacerse sensorialmente apreciable en un nuevo contacto con la materia.

KEPLERO (1571-1630), se refirió a la luz en términos poco precisos, de los cuales se desprende que la atribuía a un derrame continuo de la materia del cuerpo luminoso, con velocidad infinita . En cuanto a la visión, adoptó los

concepto de Al Hazen pero, ampliando el estudio del ojo humano, consideró que, por una nueva refracción, los rayos forman en el ojo un segundo cono cuya base está en la pupila y el vértice en la retina, donde produce la visión.

GASSENDI (o más bien GASSEND) (1592-1655), volvió a defender, en Francia, el atomismo de LEUCIPO y DEMÓCRITO, y concebía la luz como una proyección de átomos que se propagan con gran velocidad y en forma rectilínea en el espacio, con lo cual queda comprobada la ley fundamental de la fotometría de la proporción inversa entre la intensidad de la luz y el cuadrado de la distancia.

Descartes

DESCARTES (1596-1650). En éste, y muchos otros conceptos, GASSEND atacaba a su compatriota y contemporáneo DESCARTES, cuyas manifestaciones acerca de la naturaleza de la luz dan lugar a apreciaciones muy distintas de parte de los historiadores de la física.

CORNÚ, por ejemplo, nos presenta a DESCARTES como el verdadero creador de la teoría de las ondulaciones, que llama «teoría cartesiana de la luz», y, sin embargo, HUYGHENS, a quien otorgamos sin vacilación ese título, dijo que: «DESCARTES, que tuvo por propósito tratar inteligentemente todos los temas de la física y que, sin duda, ha tenido mucho más éxito que cualquier otro antes que él, *no ha dicho nada que no esté lleno de dificultades o aun inconcebible, en cuanto a la luz y sus propiedades*».

Estas discordancias de apreciaciones que desorientan a quien no profundice algo del punto, encuentran su sencilla explicación en el hecho de que DESCARTES no defendió permanentemente un concepto preciso y fijo acerca de la naturaleza de la luz ni siguió una clara trayectoria conceptual, pues, como lo expresa POGGENDORFF: «En *el estudio de la reflexión y de la refracción, se muestra partidario convencido de la teoría de la emisión; en otras explicaciones, se acerca a la teoría de las ondulaciones; habla sencillamente de movimientos y afirma que no se debe creer*

que, en la visión, algo material penetra el ojo. En otros casos, parece hasta hacer revivir la teoría de Platón, cuando compara la visión con un tacto y agrega que no se ve sólo por algo que proviene de los cuerpos luminosos hacia el ojo sino también por algo que está en el ojo y se extiende de este órgano hacia el cuerpo considerado».

En su *Dióptrica* (1637), DESCARTES mismo manifiesta que no se debe o que no se puede dar una explicación causal a la naturaleza de la luz, sino limitarse a representarla y concebirla sólo por medio de imágenes.

Detengámonos un instante ante esas vacilaciones de DESCARTES, pues veremos así cuán impreciso y complejo debía ser el problema, ya que tanto hacía titubear a un filósofo genial cuyo propósito era reedificar la física sobre raciocinios indiscutibles.

En la explicación del fenómeno óptico de la reflexión, DESCARTES asimila la luz a la proyección de bolitas animadas de gran velocidad; estamos pues en pleno concepto corpuscular o teoría de emisión, y atribuimos a la luz una velocidad determinada.

Pero si el nombre de DESCARTES ocupa un lugar si no preponderante por lo menos muy importante, en la historia de la óptica, no es, por cierto, debido a sus conceptos en vista a una teoría de la naturaleza de la luz sino a su descubimiento de la ley exacta de la refracción. Ya dijimos que los fenómenos más sencillos de refracción fueron descriptos por los antiguos y que es de suponer que el conocimiento empírico de los hechos en sí, atribuibles a la refracción, pertenece ya a los tiempos más remotos, ARISTÓTELES (siglo IV a. J. C.), señalaba la aparente quebradura del palo parcialmente hundido en el agua: EUCLIDES (siglo III a. J. C.) distinguía bien los fenómenos de reflexión de los de refracción y atribuía a ésta el aumento aparente de los astros en el horizonte; CLEOMEDIO, un siglo antes de nuestra era, ya habló con mayor precisión del acercamiento del rayo luminoso a la normal, cuando este rayo pasa de un medio a otro más denso; PTOLOMEO, el gran astrónomo de Alejandría, que vivió en el siglo II de nuestra era pero cuyas doctrinas imperaron por casi mil años, no sólo tuvo ideas acertadas acerca de la refracción

sino que estableció tablas completas de índices de refracción de la luz entre distintos medios, y asombra la aproximación de sus determinaciones; AL HAZEN el célebre matemático árabe del siglo X, amplió y rectificó conceptos y cálculos de PTOLOMEO y aseguró su conservación y difusión en la ciencia árabe y, a través de los traductores y comentaristas, en el resurgimiento científico de Europa Occidental. Más cerca de nosotros, y ya próximo a DESCARTES, el ilustre astrónomo alemán JUAN KEPLERO, en la primera década de ese siglo XVII tan fecundo para la óptica, se empeñó en descubrir la ley general de la refracción estableciendo una relación con la secante:

$$i = n\, i_1 + m.\ sec.\ i_1$$

en que i es el ángulo de incidencia, i_1 el ángulo de refracción. Consideraba así que no es constante la relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción, como se creía hasta entonces, pero que convendría suponer que el ángulo de incidencia está constituído por dos partes: una, proporcional al ángulo de refracción ($n\, i_1$), y la otra, a su secante ($m.\ sec.\ i_1$).

En su *Dióptrica*, en fin, en 1637 DESCARTES *publicó* la ley exacta de la refracción:

$$n = \frac{sen.\ i}{sen.\ r}$$

El prudente empleo que acabo de hacer de la palabra *publicó* tiene sus serios motivos, pues surge aquí una pregunta: «¿Fué DESCARTES el primero en descubrir la ley de la refracción?». La respuesta es clara: «No. Evidentemente no.» En efecto, el holandés WILLEBRORD SNELLIUS, que murió a los 35 años de edad, en 1626, es decir once años antes de la publicación de la *Dióptrica* de DESCARTES, estableció la misma ley, experimentalmente, expresándola así en un manuscrito de la manera siguiente:

$$n = \frac{cosec.\ r}{cosec.\ i}$$

¿Conoció DESCARTES esa ley de SNELLIUS? HUYGHENS lo afirmó categóricamente y también lo creyó ISAAC VOSSIO, quien fué realmente el primero que publicara la ley de SNELLIUS, recién en el año 1662, es decir un cuarto de siglo después de la publicación de DESCARTES.

Fácil sería sembrar ciertas dudas acerca de la imparcialidad de HUYGHENS y de ISAAC VOSSIO, recordando que ambos eran compatriotas de SNELLIUS y, además, que el padre de VOSSIO había sido su discípulo y amigo. Esta discusión acerca de los méritos y derechos de DESCARTES en el descubrimiento de la ley de la refracción dura desde hace tres siglos, y —es preciso confesarlo— no siempre permanecen ajenos al fallo de cada juez, ya sus sentimientos de carácter nacional, ya su tendencia personal hacia o contra las doctrinas cartesianas. Sin embargo, es particularmente a un sabio holandés, a KORTEWEG (1), al que debemos la mejor defensa de la honestidad de DESCARTES, pues este físico demostró, a base de documentos, los hechos siguientes: 1º) DESCARTES estableció la ley en 1626 ó 1627, y SNELLIUS en 1625 ó 1626; 2º) De acuerdo con este dato, no intervinieron para nada las estadas de DESCARTES *en Holanda* (Primera estada: 1617-19; segunda estada: 1621-22; tercera estada: 1629); 3º) GOLIUS, amigo de SNELLIUS, encontró por vez primera el manuscrito inédito de éste en 1632, cuando DESCARTES ya había descubierto su ley y la había comunicado por carta a varios sabios.

Pese a estas afirmaciones y documentos presentados por el sabio holandés KORTEWEG, historiadores actuales siguen afirmando que DESCARTES no hizo más que traducir la relación de cosecantes de SNELLIUS en relación de senos, es decir que su único mérito sería el haber dado a la ley la expresión que, por más cómoda, fuera adoptada universalmente y permanece incambiada en la ciencia actual.

¿Por qué ese empecinamiento con DESCARTES? ¿No es frecuente el hecho de que un descubrimiento dé gloria a

(1) *Descartes et les manuscrits de Snellius.* («Revue de Métaphysique et Morale». París, 1896).

un sabio y que, luego, se descubra que otro sabio había tenido la misma idea anteriormente sin hacerla conocer o sin que se le prestara, a veces, la debida atención?

CAVENDISH descubrió las leyes que dieron gloria a COULOMB, con bastante anterioridad a éste, pero MAXWELL recién descubrió este mérito de CAVENDISH cuando ya COULOMB había recibido el justo y glorioso premio de su labor original. SADI CARNOT, creador del segundo principio de la Termodinámica, también lo fué del primero, pero nadie discute el derecho de MAYER, porque mucho después de la tan meritoria actuación del desdichado médico alemán, se conocieron los manuscritos del joven y genial ingeniero francés.

Resulta interesante, por lo categórico y absoluto, volver a leer lo que nos dice el noble y generoso ARAGO en sus *Noticias Biográficas: «Un palo introducido parcialmente en el agua parece quebrado; los rayos que nos hacen ver la porción inmergida deben haber cambiado de ruta o haberse quebrado ellos mismos al pasar del agua al aire. Hubo un tiempo en que se limitaba a esta observación los conocimientos que, sobre refracción atribuíamos a los antiguos. Pero al exhumar del polvo de las bibliotecas que aun sepultan tantos tesoros, un manuscrito de la Óptica de* PTOLOMEO, *se encontró que la escuela de Alejandría no se limitó a la comprobación del hecho, pues esa obra encierra para todas las incidencias determinaciones numéricas bastante exactas... En cuanto a la ley matemática de esas desviaciones, que el árabe* AL HAZEN, *que el polonés* VITELO, *que* KEPLERO *y otros físicos buscaron inútilmente, es a* DESCARTES *a quien se debe. Yo digo* DESCARTES, *y únicamente* DESCARTES, *pues si las reclamaciones tardías de* HUYGHENS *a favor de su compatriota* SNELLIUS *fueran acogidas, sería preciso renunciar para siempre a escribir la historia de las ciencias. Una ley matemática tiene más importancia que un descubrimiento ordinario, pues es de por sí una fuente de descubrimientos...* DESCARTES *se empeñó pues en establecer su ley de refracción por consideraciones puramente matemáticas; tal vez fuera así mismo como la encontró...»*

Para nosotros, aquí, en este «nuestro tema», de estudio de la evolución de teorías acerca de la naturaleza de la luz — aun si negáramos a DESCARTES todo derecho al descubrimiento independiente de la ley, o si sólo abrigáramos ciertas dudas acerca de su originalidad— no limitaríamos nuestro interés por su labor al simple hecho de haber acertado en cuanto a la expresión formal de la ley. Lo que nos interesa destacar particularmente en ese descubrimiento es el origen conceptual acerca de la naturaleza de la luz que guió a DESCARTES, mientras que SNELLIUS se fundó esencialmente en la observación empírica. Este mérito lo señaló ya, aunque con falsa apreciación de valores debida a la época, MONTUCLA, en su célebre *Historia de las Matemáticas,* publicada a mediados del siglo XVIII, pues dijo: «*Si no debemos a* DESCARTES *el descubrimiento de la ley de la refracción, no se le puede discutir por lo menos el mérito de haber dado su primera explicación razonable, deducida de una sana física.*»

DESACRTES consideró el rayo luminoso como una proyección de balas que pierden más velocidad al chocar contra un cuerpo blando que contra un cuerpo duro. De esta falsa concepción nació la ley exacta. ¿No es ésta eterna y maravillosa característica de la historia de la física, y de la ciencia toda? ¿No es éste el milagro del saber humano, que, de su obscuridad hace surgir la luz, de su error, la verdad? Con un uso habilidoso de un efímero e ilusorio instrumental de hipótesis creadas por su propio espíritu, el físico elabora obras que, comprobadas por la experiencia material, imponen sus consecuencias reales como adquisiciones definitivas de la ciencia.

Volviendo a DESCARTES y a su ley de la refracción, descubrimiento real elaborado por una hipótesis falsa, vemos que de allí sacó una conclusión no menos inexacta, pues afirmó que la velocidad del rayo luminoso es mayor en un medio más denso que en un medio rarificado. Veremos con FERMAT, cómo de inmediato esta afirmación de DESCARTES levantó la oposición de los sabios, y veremos cómo, en el siglo XIX, la experiencia dió su fallo final.

En su estudio de la refracción, en fin, DESCARTES, con su acostumbrado procedimiento de comparaciones, nos coloca de nuevo, en forma evidente, ante el concepto corpuscular de la luz, con velocidad finita.

En otras partes, sin embargo, DESCARTES afirma que la velocidad de la luz es infinita, pues en caso contrario, las estrellas fijas tendrían un movimiento aparente. Esta demostración por el absurdo carece de exactitud debido al desconocimiento de la aberración, cuyo descubrimiento se debió a BRADLEY, casi un siglo más tarde (1727); empero, este mismo error de DESCARTES tiene el indiscutible mérito de significar la previsión teórica de dicho fenómeno.

En la explicación de los colores, que aparece en su obra *Meteoros* (1637), DESCARTES considera que la luz está constituída por pequeñas esferas sin elasticidad, con una velocidad finita, idéntica para todos los colores correspondientes a su propagación rectilínea, y con otra velocidad correspondiente a un movimiento de rotación del que dependen los colores.

Supone que existen tres colores fundamentales: el rojo, que corresponde a una velocidad de rotación de los corpúsculos de luz mayor que su velocidad de traslación; el violeta, correspondiente a la igualdad de esas velocidades, y el verde, para el cual la velocidad de rotación es menor que la de traslación. Los colores en sí sólo existen en el ojo pues son producidos por las variaciones de intensidad del choque de los corpúsculos en la retina, variaciones debidas a las diferencias de velocidad de rotación, ya que la velocidad de traslación es la misma para todos los colores.

Vemos aquí que DESCARTES quiso dar una explicación cinética de los fenómenos luminosos y es éste otro indiscutible mérito en medio de este extraordinario desconcierto acerca de la luz.

Pero, además del concepto corpuscular de la luz, coincidente con la teoría de la emisión, DESCARTES nos presenta otra imagen en completa oposición con ese concepto.

En efecto, concibe la luz como el resultado de la propagación de vibraciones de las partículas del cuerpo luminoso a las partículas no elásticas y perfectamente conti-

guas de un flúido sutil que es el éter. Un rayo de luz se vuelve así una hilera de partículas de éter agitadas con pequeñas vibraciones que les fueron comunicadas por el cuerpo luminoso.

Dice DESCARTES en su *Dióptrica: «La luz no es, dentro de los cuerpos luminosos, sino cierto movimiento o acción muy pronta y viva, que pasa hacia nuestros ojos por intervención del aire y otros cuerpos transparentes, de la misma manera que pasa, por el intermedio de su bastón y hacia su mano, el movimiento o la resistencia de los cuerpos que encuentra un ciego».*

Aplicando la misma imagen del bastón a los colores, agrega: *«Así como, con el bastón, nos damos cuenta, en cierta medida, de la naturaleza del objeto tocado, así los colores de los cuerpos coloreados no son más que las diversas maneras con que esos cuerpos transmiten el movimiento a nuestros ojos...»*

Este concepto mecánico de la luz no debe ser confundido con el concepto ondulatorio; DESCARTES jamás habló de ondulaciones sucesivas; sus expresiones corresponden más bien a la idea de «presiones» sucesivas ejercidas por las moléculas del cuerpo luminoso sobre el rayo, verdadera varilla invariable constituída por las partículas contiguas y no elásticas del éter y que propaga esas presiones instantáneas (1). Este concepto de presión tiene además su historia propia y podríamos encontrar su origen ya en el filósofo estoico del siglo III a. de J. C., CRISIPO (Diog. Laert. lit. 7. Sect. 15), ya, en el siglo VII de nuestra era, en una especulación de FILOPÓN de Alejandría (Philoponus de anima. Lib. 2, text. 69, p. 123), quien comparaba el rayo de luz a un cordel tendido que ejerce alternativamente presiones y tracciones, siendo el sol el que mueve el cordel, y la «materia sutil» la substancia del cordel.

El criterio que acabo de sostener coincide perfectamente con la siguiente afirmación de VERDET: «DESCARTES *no considera la luz como un movimiento propagado por ondas sucesivas sino como una presión trasmitida instan-*

(1) DESCARTES. *Dióptrica.* Cap. I, Sec. 3.

táneamente por intermedio del segundo elemento; no puede además deducir de esta extraña noción la explicación de fenómeno alguno. Es difícil poder concebir cómo EULER *ha podido encontrar en esta* vana doctrina *un primer esbozo de la teoría de las ondulaciones y cómo esa afirmación de* EULER *pudo ser repetida por todos...»* (1).

HUYGHENS, quien probablemente leyera a DESCARTES con más atención que sus sucesores, presentó él mismo su propio sistema ondulatorio como totalmente opuesto al sistema cartesiano.

He aquí pues una rápida visión de la multiforme intervención de DESCARTES en éste el tema de nuestra preocupación: la explicación de la naturaleza de la luz.

Fermat — Grimaldi — Hooke — Roemer

FERMAT (1601-1655). — Ya dijimos que el contemporáneo de DESCARTES, célebre matemático y gran maestro en «Optica geométrica», FERMAT, se opuso al postulado impuesto por ésta acerca de una mayor velocidad de la luz en los medios más densos, y demostró que, con el criterio opuesto, se puede llegar también a la ley de refracción con sólo apoyarse en el «principio de la menor acción», y no eligiendo el «camino más corto» para el recorrido de la luz sino el «camino más fácil» o sea: «el tiempo más corto». Esta observación de FERMAT o «principio de tiempo mínimo» ha sido recogida por los físicos modernos, como lo veremos más adelante, y puede ser considerada como gran principio de la Optica Geométrica, siendo su equivalente en Mecánica el principio de MAUPERTUIS-EULER.

La discusión entre FERMAT y DESCARTES fué viva y FERMAT la inició antes que apareciera la *Dióptrica*, de DESCARTES, pues había logrado obtener una copia estando aún la obra en prensa. No fué sólo la explicación cartesiana de la refracción lo que FERMAT atacó, sino tam-

(1) VERDET. *Oeuvres*. Tomo I, pág. 318.

bién la de la reflexión. Criticaba en DESCARTES su procedimiento de comparaciones, que, en su opinión, «*constituye un medio de demostración más odioso aun en geometría que en las simples conversaciones sociales.*»

Se logró apaciguar los ánimos de los dos contendores en esta científica reyerta, pero sólo momentáneamente, pues cuando, veinte años más tarde, el cartesiano CLERSELIER volvió a defender los conceptos de su maestro desaparecido, FERMAT volvió a atacarlos con el mismo vigor de antaño.

He aquí pues uno de los primeros incidentes que señalan el aspecto de torneo y de conflicto de esta admirable lucha secular de conceptos, de esta gran cruzada por el misterio de la luz.

Los dos ilustres campeones del próximo torneo, HUYGHENS y NEWTON, también se enfrentaron con respecto al incidente FERMAT-DESCARTES, siendo el holandés partidario de FERMAT y el inglés partidario, en esta ocurrencia, de su habitual rival, DESCARTES. Fué sólo en 1854, con las medidas de la velocidad de la luz dentro del agua y dentro del aire, realizadas por FOUCAULT, cuando la experiencia falló a favor de FERMAT, y por consiguiente a favor de HUYGHENS y de su concepto ondulatorio, en contra de DESCARTES y también en contra de NEWTON, que representaba el concepto corpuscular de la teoría de las emisiones.

Recordemos aún que FERMAT, que defendió acertadamente las leyes de caída de los cuerpos, descubiertas por GALILEO, también coincidió con el gran pisano —que DESCARTES tan poco apreciaba —en cuanto a la velocidad de la luz y a su determinabilidad experimental. Volvió a proponer así el mismo método que imaginara GALILEO y que, tan en vano, trataran de realizar los académicos del Cimento.

GRIMALDI (1618-1663). — Quince años después de la muerte de DESCARTES, o sea en 1665, apareció la obra

póstuma de GRIMALDI, honesto experimentador italiano, quien, por modestia o falta de capacidad de teórico, no se había animado a dar publicación a sus trabajos de óptica. En ellos se encuentran sin embargo, además del descubrimiento de la difracción y de una observación, poco precisa y consciente, de la dispersión y de las interferencias, afirmaciones que demuestran que su autor vislumbró el concepto ondulatorio de la luz, pero sin lograr adaptarlo en forma de teoría a los fenómenos luminosos por él observados.

Aunque los razonamientos de GRIMALDI se basaran frecuentemente en el concepto corpuscular, él se complacía en repetir que la luz consiste en el movimiento ondulatorio de un flúido que llena todos los espacios y que ese movimiento es comparable a la propagación del sonido en el aire. Recurría además a la comparación de las ondas luminosas con ondas formadas por una piedra que cae en el agua, y llegó aun a hacer esta afirmación paradojal que fué confirmada por YOUNG, FRESNEL y ARAGO en el siglo XIX: luz + luz = oscuridad, o sea que una onda luminosa sumada a otra onda luminosa puede anularla y producir obscuridad.

El tenue fulgor que surgió en el espíritu de GRIMALDI nos anuncia la clara luz que había de brillar en el privilegiado cerebro de HUYGHENS.

HOOKE (1635-1702). — Diez años después de la publicación de la obra póstuma de GRIMALDI, es decir, en 1675, el sabio inglés HOOKE, que la historia recuerda por numerosos estudios e inventos, volvió a ocuparse de la «difracción» o «inflexión» y, aunque no conociera la obra de GRIMALDI, buscó nuevamente la explicación del fenómeno en el concepto ondulatorio, definiendo la luz como «*movimiento rápido de vibraciones de muy pequeña amplitud*» (1). Pero hizo más aun, pues, en medio de erro-

(1) HOOKE. *Micrographia*, pág. 55.

res y confusiones, tales como su empecinada defensa de la instantaneidad de propagación de la luz, pese a la experiencia decisiva de ROEMER, y con esa intuición fogosa y algo superficial que lo caracteriza, afirmó textualmente, en su *Micrographia*, que: «*El movimiento de la luz, cuando es producido en un medio homogéneo se propaga por impulsiones u olas simples y de forma constante, perpendiculares a la línea de propagación*». El tenue fulgor en el espíritu de GRIMALDI tomó ahora el aspecto de un relámpago...

He aquí el germen no sólo de la teoría ondulatoria que HUYGHENS defendiera varios años más tarde, sino del concepto de onda transversal que FRESNEL propuso como solución salvadora a principios del siglo XIX. Pero no nos dejemos arrastrar por el entusiasmo. HOOKE, el irascible enemigo de NEWTON, no tenía fuerza científica suficiente para comprobar y ampliar esos chispazos de su fecunda intuición y por eso su grande y orgulloso rival y compatriota dijo de él, no sin exagerado desprecio: «HOOKE *no ha hecho nada y, sin embargo, se ha expresado como si todo lo supiera, todo lo hubiera profundizado, con excepción de lo que exigía la fastidiosa molestia de las observaciones y de los cálculos...*»

Como ya lo dijimos, HOOKE admitía la propagación instantánea de la luz. ¿Cómo atribuirle entonces, como lo hicieran YOUNG y ARAGO, la exacta comprensión del principio de las interferencias? Hay en la efervescente y caótica concepción de HOOKE una extraña combinación, o mezcla, de ideas que lo acercan ya hacia DESCARTES, ya hacia GRIMADLI. La luz es un movimiento dentro de una materia; pero, para HOOKE, movimiento y materia no son esencialmente distintos, sino que se confunden y sustituyen entre sí. Y este movimiento de la luz debe ser vibratorio, constituído por ondas sucesivas, y todas las cualidades y propiedades distintas de la luz se deben a las variaciones impuestas a esas vibraciones por el medio vibrátil en que se propaga.

Intuiciones geniales o aciertos casuales que se asoman en las muchas ocurrencias de HOOKE, lo cierto es que, en su

obra, surgen evidentes señales precursoras de nuevas soluciones para el problema de la naturaleza de la luz.

ROEMER (1644-1710). — Pese a nuestra impaciencia por llegar cuanto antes al próximo torneo importante de esta lucha científica y en ver frente a frente a los dos gloriosos campeones, HUYGHENS y NEWTON, debemos ubicar aquí una fecha y un hecho: la determinación experimental de la velocidad de la luz por el astrónomo danés OLAF ROEMER, en el año 1676. No hacemos aquí —lo repetimos— la historia de la óptica y de sus descubrimientos, sino que nos empeñamos en limitarnos a la evolución de los conceptos fundamentales acerca de la luz y de las teorías de su naturaleza. Pero este hecho experimental de ROEMER, con su demostración real, evidente, incontrovertible, de la velocidad finita de la luz a través de los espacios celestes, surgió con doble característica de cimiento en que fundar los conceptos teóricos y de límite y traba a las especulaciones hipotéticas. ROEMER logró realizar el proyectado experimento de GALILEO; pero no utilizó pantallas colocadas a una pequeña distancia terrestre que la luz recorre en un tiempo cuya extrema brevedad no logran captar nuestros sentidos; tampoco echó mano a aparatos de que disponían los sabios de la época.

ROEMER, recogiendo una idea que CASSINI emitiera y luego abandonara, atribuyó las irregularidades en las observaciones de los eclipses de los satélites de Júpiter a diferencias en el tiempo que la luz invierte en recorrer espacios cuya longitud varía según las posiciones relativas entre la Tierra y el sistema de Júpiter.

Para mayor gloria del gran pisano, merece ser recordado aquí, de paso, que esos satélites de Júpiter, que ROEMER se disponía a utilizar como magnífico instrumental para su medida directa de la velocidad de la luz, a manera de pantallas de GALILEO convenientemente agigantadas, fueron descubiertos por el mismo GALILEO en el año 1610.

En el movimiento de nuestro sistema planetario solar, ROEMER entendió que la disminución de la distancia entre Júpiter y la Tierra adelanta nuestra observación visual del eclipse mientras que el aumento de dicha distancia la retarda.

Como, tanto esas distancias en sus momentos extremos como el momento preciso en que los eclipses tienen lugar realmente, eran determinados con exactitud por cálculos astronómicos, gracias a los admirables trabajos de GALILEO, KEPLERO, NEWTON..., bastaba, medir las irregularidades denunciadas por su observación visual y atribuibles sólo a la demora de la luz en su propagación, para calcular sencillamente la velocidad de ésta por una simple división entre los valores de distancia y tiempo. Así apareció pues el valor aproximado de la velocidad de la luz, por medida directa; y llenó de asombro su monto fantástico de 327.000 kilómetros por segundo, o sea ocho veces la vuelta de nuestro mundo a lo largo de su meridiano, en un segundo.

La experiencia de ROEMER decretó la muerte de la creencia en la propagación instantánea de la luz, que había mantenido entre afirmaciones contradictorias DESCARTES, y a la cual se aferraron aun, empecinadamente, algunos sabios como HOOKE, que acabamos de citar. Con esta conquista, todos los conceptos sobre la naturaleza de la luz debían tomar como premisa ese valor determinado de la velocidad de su propagación, de importancia fundamental especialmente para quienes estaban inclinados a resolver el enigma desde un punto de vista mecanicista y dinámico.

Es así que los conceptos de NEWTON y de HUYGHENS descansan en ese hecho...

Huyghens y Newton

HUYGHENS (1629-1695) y **NEWTON** (1642-1727). — Acabamos de citar los nombres de HUYGHENS y de NEWTON. Hemos llegado al instante en que los dos conceptos

acerca de la luz, concepto corpuscular y concepto ondulatorio, hasta ahora confusos o confundidos, se precisan y se separan como si, sometida su mezcla a un proceso de destilación, cada uno de ellos se condensara, gota por gota, uno en la obra de NEWTON, y el otro en la obra de HUYGHENS.

Trataremos simultáneamente a ambos sabios, pues sería difícil establecer una verdadera prioridad cronológica entre ellos. En efecto, la obra en la cual NEWTON reunió sus conceptos acerca de la emisión es la *Optica*, que sólo hizo conocer en 1704, fiel, al parecer, a su colérica amenaza de no publicar nada sobre óptica mientras viviera su encarnizado opositor HOOKE; y la teoría de HUYGHENS fué publicada en el *Tratado de la Luz*, en 1690. Pero esta prioridad de catorce años a favor de HUYGHENS queda compensada, por otra parte, por el hecho de que la defensa de la teoría de la emisión ya fué emprendida por NEWTON desde 1669 (con cierta anterioridad a la experiencia de ROEMER), mientras que HUYGHENS sólo defendió la teoría de las ondulaciones en 1678. En verdad, dada la duración de la gestación de sus conceptos y recordando que ambos sabios estuvieron en relación directa en Londres en 1689, o sea antes de sus publicaciones definitivas sobre la luz, podemos considerar como simultáneo el desarrollo de sus defensas de ambas teorías.

Como en un torneo de caballería, ambos caballeros aprestaban, a un tiempo, sus armas...

NEWTON inició, en 1666, sus conocidas experiencias sobre el análisis de la luz solar por la dispersión en el prisma y estableció como consecuencia, la teoría de los colores. Tenía entonces 23 años y sus fuentes de conocimientos en óptica eran las obras de KEPLERO, de DESCARTES y de su propio maestro BARROW.

De la dispersión, NEWTON pasó a la explicación de los «anillos coloreados», fenómeno al cual quedó unido su nombre, aunque BOYLE y HOOKE lo observaran y estudiaran con anterioridad.

Esa prioridad de HOOKE, más aun que su disparidad de conceptos, fué la causa real de la rivalidad entre los dos

sabios y provocó la resolución de NEWTON de no publicar, sino después de la muerte de su compatriota, todos sus trabajos sobre la luz, reunidos en aquella *Optica*, «código indiscutido» que impuso el dogma de la teoría de la emisión durante todo el siglo XVIII y el primer cuarto del XIX, obra cuyas ediciones se sucedían sin cesar, año tras año, mientras el *Tratado de la Luz* de HUYGHENS pasaba inadvertido.

NEWTON, cuyas obras físicas tienen características típicamente matemáticas, insistía sin embargo en mostrar que él no era un matemático que utilizara la física como un medio de cumplir con su fin matemático, sino, muy al contrario, se declaraba un físico que realizaba las investigaciones, descubrimientos y determinaciones, ante todo por la experiencia, y luego los sometía al cálculo matemático como a un lenguaje de expresión precisa y segura. Su afirmación de *Hypotheses non fingo* («Yo no forjo hipótesis»), tomada estrictamente al pie de la letra, sería, para un físico, una inhibición insostenible; lo que NEWTON quiso expresar así, conjuntamente con una crítica directa al cartesianismo, es que su método descansa en la experiencia, efecto real de un orden natural, matemáticamente expresable.

Tanto en Dinámica como en Óptica, lo vemos seguir ese método; y si NEWTON se inclinó a favor del concepto corpuscular o atómico de la luz fué, tal vez, influído por su formación de «dinamista», pues la idea del punto material y la aplicación de fuerzas de atracción le resultaban perfectamente adaptables al concepto corpuscular de la luz y no a su explicación por movimientos ondulatorios. Agréguese aun a ello la dificultad inicial que encontraba la teoría ondulatoria en explicar el fenómeno, aparentemente evidente e indiscutible, de la propagación perfectamente rectilínea de la luz. Parecen lógicas, pues, la elección de NEWTON y su satisfacción en poder asimilar la Optica a la Mecánica, aunque con ello no pretendiera hacer afirmaciones categóricas y definitivas acerca de la constitución de la luz. Además, el concepto corpuscular era para él un medio y no un fin; era un medio que le

permitía explicar sencillamente, la velocidad finita de la luz, demostrada por ROEMER y comparable a la velocidad de proyectiles de libre trayectoria en un medio sin frotamiento, ya que la luz se detiene ante un cuerpo opaco como un cuerpo contra un obstáculo no elástico, ya que desvía su trayectoria, es decir, que se refleja en un espejo de acuerdo con las mismas leyes geométricas que cuerpos elásticos, ya que al pasar a otro medio desvía su trayectoria como un cuerpo que se lanza al agua, etc., etc....

Mientras tanto, HUYGHENS...

CRISTIAN HUYGHENS, de catorce años mayor que NEWTON, había alcanzado ya gran celebridad con obras de geometría y de astronomía, y con la teoría de los choques, y había conquistado además una popularidad universal con el invento del reloj de péndulo, cuando concentró toda su atención en los estudios de óptica, que reunió en el pequeño e inmortal *Tratado de la Luz*, primer cuadro completo y armónico de la teoría ondulatoria, obra genial por el concepto y maravillosa por la exactitur de los razonamientos, pero que no logró, sin embargo imponerse, ni conoció el éxito de la *Óptica* de NEWTON.

Y, al colocar lado a lado esas dos obras, señalemos de paso la coincidencia de que sus autores tenían la misma edad, sesenta y un años, al darlas respectivamente a la publicación.

Fué en 1678, o sea doce años antes de la aparición del *Tratado*, en una conferencia que diera en París, cuando HUYGHENS fundó su teoría de la luz en el concepto de *ondas longitudinales* (en el sentido del rayo de luz) comparables a las del sonido pero con una trepidación mucho más rápida y con el éter como medio de propagación. Este concepto lo expresó en su forma más sencilla como piedra angular de los desarrollos siguientes: «*La luz consiste en un movimiento de la materia que se encuentra entre nosotros y el cuerpo luminoso*».

HUYGHENS rechazaba, de partida, el concepto corpuscular por considerar que éste no se avenía a la extraordi-

naria velocidad de la luz tal como ROEMER acababa de determinarla, y por considerar inexplicable que rayos de luz, constituídos por la proyección de materia que viaja a través del aire como pelotas o como flechas, puedan encontrarse y atravesarse sin oponerse unos a otros.

Así como seducía a NEWTON la analogía entre la marcha de la luz y la emisión de proyectiles pequeñísimos y rapidísimos en un medio sin frotamiento, seducía a HUYGHENS la analogía entre la propagación de la luz y la del sonido, comparables, ambas, a las ondas concéntricas que forma una piedra que se tira al agua. Cada punto luminoso es un emisor de ondas en un medio particular, que les sirve de vehículo. Este es el éter, el medio en el cual están sumergidos todos los cuerpos y que llena pues todos los espacios, tanto dentro de la materia como dentro de lo que llamamos el vacío. Los problemas de Óptica se vuelven pues nuevamente problemas de Mecánica; y HUYGHENS estudió cómo obran esos puntos luminosos y las ondas que provocaba, dentro del medio etéreo, que se figuraba constituído por esferillas perfectamente elásticas.

El sabio holandés atribuyó sus primeras convicciones en el concepto ondulatorio al Padre PARDIES, un matemático francés que murió antes de poder publicar una obra sobre ondulaciones luminosas cuyos primeros capítulos había enseñado a HUYGHENS. Pero el gran mérito de éste no consiste en haber completado y ajustado los conceptos dispersos y confusos de varios autores; consiste sobre todo en haberles agregado otro concepto, de fundamental importancia, del que derivan explicaciones mecánicas perfectas de los principales fenómenos luminosos. Es éste el «principio» o la «construcción de HUYGHENS», que permanece en nuestras obras clásicas de hoy tal cual lo concibió su genial creador, hace dos siglos y medio.

Sin entrar en el detalle de su sencillo mecanismo, expuesto en los textos escolares de física, basta recordar que esta «construcción» o «principio de HUYGHENS» al considerar que cualquier punto del frente de una onda es a su vez un centro emisor de nuevas ondas cuyos puntos vuelven a ser centros emisores y así sucesivamente, permite en

cada instante y lugar determinar el frente de la onda como envoltura de conjunto de todas esas ondas parciales y de desarrollo concéntrico. El estudio geométrico de lo que ocurre a estas ondas, representadas por la construcción de HUYGHENS tanto cuando se propaguen libremente en un medio homogéneo, o cuando chocan contra una pared rígida como cuando penetran en otro ambiente, nos explicará, con su perfecta ratificación de los hechos experimentales ya establecidos, así como de la ley de la refracción de DESCARTES y del principio de FERMAT, el íntimo mecanismo de los fenómenos ópticos y acústicos. Y así también, dos siglos más tarde, esa misma construcción de HUYGHENS volverá a explicar el mecanismo de las ondas electromagnéticas.

Todo el *Tratado de la luz* de HUYGHENS no es más que este lógico desarrollo de su concepto inicial y de su principio original. En ningún caso, aparece más evidente que en esta obra el papel preponderante de la teoría física como grande ordenadora y generalizadora de los hechos experimentales y de las leyes que de su observación resultan.

Refiriéndose a su «principio», HUYGHENS dijo: «*Esto es lo que no era conocido por los que antes que yo han empezado a considerar las ondas de luz, entre los cuales estaban el señor* HOOKE *y el Padre* PARDIES...»

Gracias a ese principio HUYGHENS reforzó su firme convicción en la teoría ondulatoria, firmeza que contrasta con las vacilaciones de NEWTON. En efecto, NEWTON pretendió siempre mantenerse imparcial y no definirse abiertamente a favor de ninguna hipótesis. Sólo confesaba verse obligado a elegir entre los dos conceptos acerca de la luz, el concepto corpuscular, como un medio de expresión, una simple imagen que permitía describir hechos experimentales indiscutibles.

En toda su obra —y particularmente en el tercer volumen— observamos que se sentía poderosamente atraído por las explicaciones racionales y mecanistas ofrecidas por el concepto ondulatorio. CORNÚ dice: «*El tercer volumen de la Óptica ya no es la discusión imparcial de sistemas opuestos; aparece allí la pintura de los sufrimientos*

de un genio poderoso atormentado por la duda. Asistimos a un drama, al eterno combate del deber y del amor; y fué el deber el más fuerte...». YOUNG va más allá aún; basándose en los muchos argumentos favorables al concepto ondulatorio presentados por NEWTON, considera a éste, lisa y llanamente, partidario de la teoría de las ondulaciones.

No olvidemos, por otra parte, que YOUNG y CORNÚ eran grandes admiradores de NEWTON y, al mismo tiempo, partidarios irreductibles del concepto ondulatorio. Su tesis consiste entonces ya en negar la adhesión de NEWTON al concepto corpuscular, ya en buscarle atenuantes y en disculpar su defensa de hipótesis tan extrañas y contrarias al concepto físico del siglo XIX como los «accesos», esos supuestos «caprichos» de la luz...

Y si decimos aquí que se trata de hipótesis extrañas y contrarias al concepto físico del siglo XIX, con su ordenado determinismo y su sencillo mecanismo, es que dejamos subentendido que tales hipótesis no extrañan ya al físico del siglo XX, y hasta le resultan atrayentes, pues en ellas se descubre, como en el caso de los «fits» o «accesos», un factor de probabilidad, claro precursor del concepto moderno.

Los físicos del siglo XVIII veneraron en NEWTON al profeta del dogma corpuscular y le atribuyeron, sin duda, convicciones mucho más radicales al respecto de las que realmente tuviera; los físicos del siglo XIX trataron de «disculpar» los errores del genio; y, hoy, la física del siglo XX permite interpretar las vacilaciones de NEWTON como una profética visión de la solución conciliatoria entre el concepto corpuscular y el concepto ondulatorio, y permite considerar la extraña hipótesis de los «accesos» como una intuición genial.

Tratemos de juzgar con imparcialidad la posición de NEWTON y de HUYGHENS en este pleito de las teorías de la luz, y para ello tratemos de hacerlo de acuerdo con las condiciones del problema en el momento mismo de la actuación de esos dos geniales físicos y no encerrándonos en el ambiente conceptual del siglo XVIII, con su fe corpuscular,

o del XIX con su fe ondulatoria, ni aun en la doctrina de la Física Nueva de reconciliación entre ambos conceptos.

Hacia 1670, la teoría de la luz debía explicar los fenómenos siguientes:

1º) La propagación rectilínea; 2º) La reflexión; 3º) La refracción (fenómenos conocidos desde la más alta antigüedad); 4º) La dispersión, (conocida empíricamente por los antiguos y estudiada por NEWTON); 5º) La difracción, (descubierta poco antes por GRIMALDI); 6º) Los anillos coloreados (también de estudio reciente por BOYLE, HOOKE y el mismo NEWTON).

Veamos ahora cómo podía ser considerado cada uno de esos fenómenos desde los dos puntos de vista en pugna:

1. — *La propagación rectilínea* se explica evidentemente con mayor facilidad por el concepto corpuscular: El rayo recto es la trayectoria natural de corpúsculos emitidos por una fuente luminosa. El concepto ondulatorio, al contrario, encuentra tan serias dificultades en dar una explicación satisfactoria de la propagación rectilínea de la luz que sólo pudo lograrla FRESNEL, un siglo y medio después de la época que nos ocupa.

En efecto, en el principio de HUYGHENS cada punto de una onda es un nuevo centro de ondas; por consiguiente, aunque por medio de un obstáculo se separara un haz o un «rayo» de ese conjunto de ondas concéntricas, podría creerse que, pasado el obstáculo, los puntos luminosos darían lugar a un nuevo conjunto de ondas concéntricas que se extendieran en todo sentido por el espacio y no continuaran su propagación rectilínea. HUYGHENS contestaba a esta objeción diciendo: «*Aunque las ondas particulares, producidas por las partículas que comprende el espacio CAE* (un sector del sistema completo de ondas, de centro emisor C y de arco CE del frente de onda) *se esparcen también fuera de ese espacio, sin embargo no concurren en un mismo instante en componer juntas una onda que complete el movimiento como ocurre precisamente en la circunferencia CE que es su tangente común* (de todas las ondas particulares).

Tenía, pues, sobrada razón NEWTON en no darse por convencido y en preguntar: «*¿No son erróneas todas las hipótesis en las cuales la luz es supuesta consistir en una presión o en un movimiento propagado a través de un medio flúido? Si la luz consiste totalmente en una presión o en un movimiento propagado instantáneamente o progresivamente, se encorvaría en la sombra, pues una presión o un movimiento no puede propagarse en línea recta en un flúido, más allá del obstáculo que detiene una parte del movimiento: hay inflexión y dispersión por todos lados en el medio en reposo situado más allá del obstáculo... Una campana o un cañón pueden ser oídos detrás de la colina que intercepta la vista del cuerpo sonoro, y los sonidos se propagan tan bien a través de tubos encorvados como en tubos rectos, mientras que no se ve jamás la luz seguir rutas tortuosas, ni desviarse hacia la sombra...*»

Fué este el principal motivo por el cual NEWTON no se resolvió a admitir el concepto ondulatorio.

2. — La *reflexión* tiene también una explicación sencilla en el concepto corpuscular: Una bolita proyectada sobre un cuerpo elástico rebota, siguiendo una trayectoria en perfecta coincidencia con la ley de reflexión de la luz, mientras que, para explicar este fenómeno por las ondulaciones, HUYGHENS debió imaginar su conocida «construcción».

3. — La *refracción* presenta un dilema más interesante que la propagación rectilínea y la reflexión.

La desviación del rayo luminoso al pasar de un medio a otro de densidad distinta, en conformidad con la ley de SNELLIUS y DESCARTES, se explica claramente por el concepto corpuscular y, bastante fácilmente, por el concepto ondulatorio, siempre que se recurra al principio de HUYGHENS. Pero, para llegar a esta explicación, los dos conceptos exigen la admisión de condiciones distintas, pues por un simple razonamiento que no es del caso reproducir aquí— se ve que el concepto corpuscular suponía que la velocidad de la luz es proporcional al índice de refracción

del medio considerado, y, por consiguiente, la velocidad de la luz debe ser mayor en el agua que en el aire, mientras que el concepto ondulatorio —que definía el índice de refracción como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en el medio refringente— conduce a la conclusión de que la velocidad de la luz es *inversamente* proporcional al índice de refracción del medio y, por consiguiente, esa velocidad es mayor en el aire que en el agua.

Recordando además el principio de FERMAT, la ley de DESCARTES y el incidente FERMAT - DESCARTES, HUYGHENS dice:

«Terminaré esta teoría de la refracción demostrando una proposición notable que de ella depende; es que un rayo de luz, para pasar de un punto a otro cuando estos puntos se encuentran en medios diáfanos distintos, se rompe en la superficie plana que une esos dos ambientes, de tal manera que emplea el menor tiempo posible, exactamente como ocurre en la reflexión contra una superficie plana. El señor FERMAT *fué el primero en proponer esta propiedad de las refracciones, comprendiendo como nosotros, y directamente en oposición con la opinión del señor* DESCARTES, *que la luz pasa más lentamente a través del vidrio y del agua que a través del aire. Pero él suponía, además de esto, la proporción constante de los senos que acabamos de probar para esos únicos grados diversos de velocidad; o todavía, lo que es lo mismo, él suponía, además de esas velocidades distintas, que la luz emplea en ese paso el menor tiempo posible, para sacar de allí la conclusión de la proporción constante de los senos. Su demostración, que se encuentra en sus obras impresas y en libro de las cartas del señor* DESCARTES, *es muy larga; daré otra más sencilla y fácil...»*

Presentábase pues el «experimentum crucis»; pero, en el tiempo de NEWTON y HUYGHENS, no podía ser dilucidado el problema, pues nadie podía pretender efectuar la delicada comparación entre la velocidad de la luz en el agua y su velocidad en el aire, cuando sólo en 1676, ROEMER

logró determinar, por vez primera, la velocidad de la luz en el espacio por procedimientos astronómicos.

Sólo a mediados del siglo XIX, FOUCAULT, en la célebre experiencia cuya descripción conocéis por los tratados de física, demostró que la velocidad de la luz es mayor en el aire que en el agua, dando así el triunfo al concepto ondulatorio y asestando un golpe certero al concepto corpuscular. Agreguemos, sin embargo, sin menospreciar el mérito de FOUCAULT, que cuando se ensañó de esta manera con el concepto corpuscular, éste ya había sido derribado por el vigoroso y científico ataque de FRESNEL. Y agreguemos aún que la Física Nueva, al acudir ahora en ayuda del concepto corpuscular, introduce ciertas hipótesis sobre la velocidad de las partículas que, gracias a conceptos relativistas y cuánticos, permiten anular la contradicción entre el concepto corpuscular y el experimento de FOUCAULT, y reintegran así la refracción al grupo de los «fenómenos neutrales» o sea de los fenómenos que se adaptan por igual a cualquiera de los dos conceptos de la luz, exactamente como ocurría en el tiempo de HUYGHENS y de NEWTON y siguió ocurriendo hasta la experiencia de FOUCAULT, en 1854.

4. — La *dispersión* resultó más adaptable a la teoría ondulatoria que a la teoría de la emisión. En efecto, el descubrimiento de NEWTON de una refrangibilidad distinta para cada color simple impone considerar cada uno de ellos como una especie distinta de luz, diferencia que no puede ser atribuída a variaciones de velocidad ya que ésta es la misma para todas las partículas de luz, en el vacío.

Entonces ¿a qué atribuir los distintos colores? ¿A corpúsculos de materias de distinta naturaleza? En primer lugar, NEWTON se limitó a observar la diferencia de refrangibilidad de los colores; pero, más tarde, atribuyó esa diferencia a distintos tamaños de los corpúsculos, de los cuales los más pequeños serían atraídos con mayor fuerza por el cuerpo refringente.

La teoría ondulatoria resuelve la dificultad con mayor facilidad, pues, como la onda se caracteriza por la velo-

cidad de propagación y por la longitud de onda, si la velocidad de propagación se considera invariable no ocurre lo mismo con la longitud de onda a cuyas variaciones podemos atribuir las diferencias de colores.

5. — Para explicar la *difracción*, los partidarios de la teoría de la emisión la atribuyeron a una fuerza repulsiva ejercida por el cuerpo sobre las partículas luminosas, pero los físicos más escrupulosos reconocieron la debilidad de esa imagen. Sabemos que la teoría de las ondulaciones incluyó la difracción dentro de la explicación general de las interferencias, pero ésta sólo fué dada por YOUNG y FRESNEL en el siglo XIX.

6. — Otro tanto puede decirse de los *«anillos coloreados»*, esos anillos o franjas de hermosos colores que irisan la superficie del agua cuando en ella se extiende una fina capa de aceite o que se forman cuando una lente se apoya en un vidrio plano o cuando se comprimen láminas de mica. Para la teoría ondulatoria este fenómeno se reduce a un caso particular de interferencias. Para la teoría de la emisión su explicación era sumamente ardua y, para lograrla, NEWTON imaginó la teoría de los «accesos» o sea de los «fits», palabra inglesa aplicable al acceso de tos como al desmayo o al capricho antojadizo, pero también a un impulso o una acción intermitente, y es esta última acepción de la palabra «fit» la que, sin duda, indujo a NEWTON a utilizarla cuando dijo: *«Todo rayo de luz en su paso a través de una superficie refringente está puesto en un cierto estado pasajero que, en la progresión del rayo, vuelve a intervalos iguales y lo dispone, en cada uno de esos regresos, a ser fácilmente trasmitido a través de la próxima superficie refringente, y, entre esos regresos, a ser fácilmente reflejado por ella»*.

He aquí pues un concepto extraño de corpúsculo material provisto de una cualidad de periodicidad, un concepto que, en la época, pudo parecer un ardid ingenioso para conciliar la teoría corpuscular con la difícil explicación del fenómeno de los anillos coloreados; pero, ahora que

estamos adaptando nuestro espíritu a la extraña concepción del corpúsculo-onda, el concepto de NEWTON puede parecernos, como ya lo dijimos, una genial profecía.

Son esos los «accesos o regresos de fácil reflexión» y los «accesos o regresos de fácil trasmisión». Son esos los accesos que fueron admitidos durante todo el siglo XVIII como parte del dogma corpuscular, los accesos que fueron ridiculizados durante el siglo XIX por el concepto ondulatorio triunfante, los accesos que reaparecen ahora en la óptica del siglo XX como un concepto necesario y salvador.

NEWTON propuso una explicación mecánica de la causa de esos accesos: Suponía que las partículas de luz hacen vibrar las moléculas del cuerpo refringente y que esas vibraciones se propagan de una superficie a la otra con una velocidad mayor que la de la luz, de modo que el rayo luminoso, al llegar a una nueva superficie, puede encontrarse con una vibración favorable a su propagación o en oposición con ella, lo que determinará un acceso de transmisión o de reflexión respectivamente, siendo alternativas dichas disposiciones.

Pero NEWTON volvió a disculparse por esa hipótesis con la cual sólo deseaba satisfacer a los que nada admiten sin una explicación de orden físico o mecánico, mientras que él mismo se declaraba satisfecho con la simple observación del fenómeno que se produce «*como si* el rayo de luz tuviere accesos alternativos de reflexión y de trasmisión».

Esta pequeña locución de «*como si*» es verdaderamente admirable, y si nos acostumbráramos a usarla en nuestros estudios modernos, tan abundantes en atrevidas y fecundas hipótesis, venceríamos tal vez con mayor facilidad la inevitable inercia de nuestras convicciones o perjuicios anteriores. Todo puede admitirse, no diciendo: «tal fenómeno ocurre *porque*...» o «Si tal fenómeno ocurre *debe* existir tal condición...», sino diciendo: «Este hecho se produce como si tales condiciones existieran...». Así se expresaba NEWTON al enunciar sus grandes «verdades científicas», colocando entre ellas y la realidad la flexible articulación de esas simples palabras: «como si».

Volviendo a nuestro tema de la luz, he aquí pues la situación de los dos conceptos antagónicos frente a la propagación rectilínea, a la reflexión, la refracción, la dispersión, la difracción y los anillos coloreados. Nuevos fenómenos ópticos se agregaron inmediatamente a éstos...

En 1669, un médico danés, ERASMO BARTHOLÍN (1625-1698), descubrió la *doble refracción* en el espato calizo cristalizado, pero consideró la refracción del rayo extraordinario como arbitraria. HUYGHENS aplicó al caso su conocida construcción, atribuyendo ondas esféricas al rayo ordinario y esferoidales al extraordinario, y descubrió así la ley de la doble refracción. Pero descubrió además otro fenómeno acerca del cual dijo: «*Es un fenómeno maravilloso y, a pesar de no haber podido encontrar su causa no puedo dejar de señalarlo para que otros la busquen. Me parece que se imponen otras suposiciones además de las mías, que no perderán con ello su posibilidad pues están confirmadas por muchas pruebas...*». Y HUYGHENS describe a continuación lo que hubo de ser llamado la *polarización de la luz.*

Dice así: «*El fenómeno consiste en que, tomando dos trozos de este cristal y aplicándolos uno sobre otro, o manteniéndolos con un espacio entre ellos, si todos los lados del uno son paralelos a los del otro, entonces un rayo luminoso, habiéndose partido en dos en el primer trozo, siguiendo las dos refracciones regular e irregular, al penetrar entonces en el otro trozo, cada uno de los rayos lo hará sin ya partirse en dos. El rayo que fué producido por refracción regular, sólo volverá a hacer una nueva refracción regular, y el otro una nueva refracción irregular. Y la misma cosa ocurre en todas las posiciones en que la sección principal de uno y otro trozo se encuentren en un mismo plano sin que sea necesario que las caras que se miren sean paralelas. Y esto es maravilloso, porque los rayos que salieron del primer cristal al llegar del aire al segundo ya no se parten. Parecería que es preciso admitir que uno de los dos rayos emanado del primer cristal haya perdido lo que es necesario para conmover la materia que*

sirve para la refracción irregular y que el otro rayo haya perdido, de igual manera, lo que se necesita para conmover la materia que produce refracción regular... Dejo pues a otros esta investigación...»

¿Qué hizo NEWTON frente al triunfo de HUYGHENS en la aplicación de la doble refracción y frente al descubrimiento empírico del «maravilloso fenómeno» que no lograba explicar el sabio holandés?

NEWTON conocía el descubrimiento de HUYGHENS de la ley de la doble refracción, pero no lo admitió, sin duda debido a su origen ondulatorio, y propuso otra ley del rayo extraordinario, ley inexacta por otra parte.

Atribuyó además a cada partícula de luz dos polos y supuso que cada rayo es un prisma cuadrangular en el cual las partículas se colocan de modo que sus polos se encuentren en dos caras opuestas, llamadas caras de refracción extraordinaria. Atribuía al espato una acción especial sobre el rayo, acción cuyo centro se encuentra en la región del pequeño ángulo sólido y que se traduce por una atracción del rayo que presente a dicho centro una cara de refracción extraordinaria, mientras que, si el rayo le presenta una de las otras dos caras o sea de refracción ordinaria, el cristal sólo ejerce sobre el rayo su acción refringente ordinaria.

Es en esa explicación donde encontramos el origen de la expresión de «polarización de la luz» con la cual denominamos el «fenómeno maravilloso» que HUYGHENS no pudo explicar con su teoría ondulatoria, que NEWTON tampoco explicó satisfactoriamente y que exigía pues «nuevas suposiciones», como lo afirmara HUYGHENS, nuevas suposiciones presentadas por FRESNEL en el siglo XIX con el concepto de las ondulaciones transversales y presentadas, en nuestros días por DIRAC, con el «spin».

Otros fenómenos, como el efecto DOPPLER, la presión de la luz o la repartición espectral de la energía radiante entran también dentro del sector de los «fenómenos neutrales» siempre que se adopten los conceptos relativistas y cuánticos que, en el siglo XX, presentaron EINSTEIN y PLANCK. Pero mantengámonos en el siglo XVII.

En resumen, y hablando en jerga deportiva: El cuadro de posiciones era favorable a la teoría de las emisiones en el final del siglo XVII, pues tenía ventaja, absoluta o relativa, sobre la teoría ondulatoria en los siguientes fenómenos: propagación rectilínea, reflexión, refracción, difracción, anillos coloreados y polarización. Sólo en la dispersión y en la doble refracción la teoría ondulatoria ofrecía soluciones menos complicadas y artificiosas que la teoría de las emisiones.

2

EL SIGLO XVIII

Juan II Bernoulli y Euler

No debe extrañarnos pues el triunfo del concepto corpuscular, y, durante todo el siglo XVIII, siglo durante el cual hicieron tantos progresos la acústica, el vapor, la electrostática, el calor y la mecánica y, en general, la Física Matemática, pero en el cual no se registraron progresos en la dilucidación del problema de la naturaleza de la luz, el dogma corpuscular, sostenido por el prestigio omnipotente de NEWTON, fué universalmente respetado. Sólo corresponde señalar la disidencia de dos sabios suizos: JUAN II BERNOULLI y LEONARDO EULER.

BERNOULLI (1710-1790), uno de los miembros de una extraordinaria familia de sabios, esbozó una teoría según la cual los corpúsculos de luz provocan condensaciones de los torbellinos del éter, condensaciones que se traducen en vibraciones longitudinales, y atribuyó la refracción a la variación de la fuerza centrífuga de esos torbellinos en distintos medios.

EULER (1707-1783), el genial matemático cuya influencia se extendió a todas las ciencias exactas, volvió a defender la teoría de las ondulaciones longitudinales de HUYGHENS, haciendo la crítica de la teoría de la emisión en sus *Cartas a una princesa de Alemania,* en 1768, Afirmaba así que, cuando oímos un violín que toca, no llegan a nuestros oídos pedazos del violín, del mismo modo cuando nosotros vemos la luz del sol no nos llegan fragmentos del sol a los ojos; en el primer caso sólo hubo vibración del aire, en el segundo vibración del éter. Ya en su *Teoría Nueva de la Luz,* en 1764, EULER tuvo el mérito de ser el primero en volver a proponer la teoría de HUYGHENS y la extendió a la explicación de los colores constitutivos de la luz blanca por la variación de longitud de ondas, explicación que HUYGHENS evitó exponer en su obra pero que está perfectamente expuesta por NEWTON en una de sus tantas manifestaciones favorables a las ondulaciones.

Hemos llegado al umbral del siglo XIX, siglo que nos presentará desde su principio, la reiniciación de las hostilidades entre el concepto corpuscular y el concepto ondulatorio; luego asistiremos al triunfo de la teoría de las ondulaciones renovada por FRESNEL e incluída más tarde en la vasta síntesis de MAXWELL... Luego, en fin, llegará el siglo XX con la Física Nueva y sus conceptos insospechados...

CAPÍTULO IV

LA LUCHA SE REANUDA

2º EPISODIO: DESQUITE DE LAS ONDAS

LA CUESTION DE LAS INTERFERENCIAS

En capítulos anteriores, después de algunas divagaciones acerca de la Historia de la Ciencia y, particularmente, de la Historia de la Física, y después de haber recordado el drama que viven actualmente muchos físicos empíricos frente a los símbolos desconcertantes de la Física Nueva, formal y esencialmente matemática, nos hemos ceñido estrictamente a una síntesis metódica de la evolución de los conceptos acerca de la naturaleza de la luz, desde la antigüedad hasta principios del siglo XIX. Nos hemos detenido especialmente en el siglo XVII, para recordar las volubilidades de DESCARTES y, más aun, para trazar, con las sabias vacilaciones de NEWTON y las firmes convicciones de HUYGHENS, un cuadro exacto del primer episodio realmente importante de la lucha secular entre el concepto corpuscular y el concepto ondulatorio.

El siglo XVIII sólo nos impuso recordar, fuera del respeto universal hacia la teoría de la emisión fortalecida por el inmarcesible prestigio científico de NEWTON, la disidencia de JUAN II BERNOULLI y la de LEONARDO EULER, quien volvió a defender el concepto de las ondas longitudinales, ampliado a la teoría de los colores.

1

SIGLO XIX. — LAS ONDULACIONES

Y llegamos así al siglo XIX que, desde su principio, nos presenta la reiniciación de las hostilidades entre el concepto corpuscular y el concepto ondulatorio, hostilidades que terminaron con el amplio triunfo, el magnífico des-

quite de la teoría de las ondulaciones: es éste *el segundo episodio* importante de esa lucha de conceptos.

Dos nombres surgen de inmediato al espíritu, al recordar este episodio: YOUNG y FRESNEL; el primero es el del iniciador, y el segundo, el del triunfador en este nuevo episodio de la lucha. El incidente causante de la reiniciación del conflicto, el nuevo «casus belli» fué: la *Cuestión de las Interferencias.*

Young — Wollaston

YOUNG (1773-1829). — Un extraño, un admirable personaje se presenta ahora en el campo de acción: el doctor TOMAS YOUNG, médico, orientalista, matemático, botánico, fisiólogo, químico, poligloto, músico, célebre físico y perfecto «gentleman» inglés, uno de los últimos sabios enciclopédicos.

En 1800, YOUNG —que tenía a la sazón 27 años, era médico y ya se había hecho notar por un estudio acerca del calor— publicó un folleto en el cual se declaraba partidario del concepto ondulatorio con ondulaciones o vibraciones longitudinales, de acuerdo con HUYGHENS y EULER.

YOUNG fué probablemente atraído hacia el estudio del concepto ondulatorio de la luz por el fenómeno acústico de las pulsaciones, es decir, de las combinaciones de vibraciones acústicas que se producen cuando dos notas muy vecinas, pero no de idéntico origen ni de un mismo período, se hacen oír simultáneamente.

En el principio, esas vibraciones casi concuerdan y se refuerzan; luego, una de las notas se retarda y llega a establecer una absoluta discordancia, alcanzando un mínimo la amplitud del sonido; pero un nuevo retraso combina las vibraciones para formar entonces un máximo de amplitud; y así, sucesivamente, alternan los refuerzos y los debilitamientos del sonido, que se designan muy acertadamente con la palabra «pulsaciones».

Este fenómeno había sido observado por SAUVEUR en 1701; SORGE (1744), ROMIEU (1753) y TARTINI (1754) descubrieron los sonidos diferenciales o «tartínicos» que LAGRANGE (1795) atribuyó a rápidas pulsaciones, en una teoría que YOUNG defendió.

Todo el intenso movimiento científico en pro del progreso de la acústica, con el estudio analítico de sus vibraciones y, más particularmente, investigaciones especiales acerca de esos fenómenos acústicos producidos por las combinaciones de vibraciones, fueron sin duda lo que atrajo a YOUNG hacia el estudio de las interferencias luminosas, por evidente similitud con el problema de las interferencias de ondas sonoras. Pero es interesante recordar, además, como lo señala VERDET, que YOUNG invocaba frecuentemente una explicación de NEWTON que contribuyó a ponerlo en el camino de su interpretación de las interferencias. En el 3er. libro de los *Principios*, NEWTON explicó, en efecto, que irregularidades que HALLEY descubriera en el mar de China pueden atribuirse al hecho de que las aguas del océano penetran en ese mar, simultáneamente por dos estrechos, uno al Norte y otro al Sur de las Filipinas, y que, al llegar una de las dos corrientes de agua con seis horas de atraso sobre la otra, las ondas se destruyen entre sí.

Digamos pues, para ser más exactos, que, del estudio de las combinaciones de ondas acústicas y también acuáticas, YOUNG pasó lógicamente a las ondas luminosas, tratando de obtener con ellas fenómenos similares de destrucción y de acumulación.

Demostró, con un experimento clásico, que el encuentro de rayos luminosos monocromáticos emanados de una misma fuente, o sea pues de longitud de onda idéntica, produce, después de haber recorrido dichos rayos caminos ligeramente distintos, franjas brillantes y obscuras debidas respectivamente a superposiciones de ondas en fases idénticas y a destrucciones de ondas en fases opuestas.

El «experimento de YOUNG» consistía en proyectar un haz de luz monocromática sobre una pantalla con dos agujeritos. Detrás de esta pantalla se coloca una segunda

en la cual se observan bandas alternativamente obscuras y brillantes en la zona en que se entrecruzan los dos conos de luz emanados, cada uno, de uno de los agujeros de la primera pantalla. Estas bandas desaparecían cuando, en lugar de dirigir sobre la primera pantalla un haz de luz, se dejaba caer directamente la luz solar, como también desaparecían si se tapaba uno de los agujeros. Esas bandas ocupaban con toda precisión las posiciones previsibles por el razonamiento teórico acerca de la composición de las vibraciones luminosas en esos rayos de luz del mismo origen pero de caminos ligeramente desigualados por su paso por los agujeros distintos.

Reemplazando la luz monocromática por luz blanca, las franjas brillantes y obscuras se tornaron en franjas de distintos colores como los anillos coloreados, y así YOUNG comprendió también a éstos en el fenómeno de las interferencias. Ocurrió otro tanto con la difracción, cuyas franjas coloreadas, observadas por GRIMALDI, fueron atribuídas por YOUNG a las interferencias producidas entre el rayo de luz directa y el rayo difractado o sea reflejado en el borde del objeto.

Dos años más tarde, reinició detalladamente el estudio de los anillos coloreados de NEWTON en láminas, no explicándolos ya por la teoría de los accesos, universalmente admitida desde hacía un siglo, sino por las interferencias o sea por el concepto paradojal de la destrucción de la luz por la luz misma.

La primera memoria que YOUNG presentara a la Sociedad Real de Londres en 1800 se titulaba *Experiencias e investigaciones acerca del sonido y de la luz;* allí el sabio inglés hacía la crítica comparativa de la teoría de las emisiones y de la teoría de las ondulaciones; asimilaba la ley de los anillos coloreados a la ley de los tubos cerrados y se refería ya a la exacta interpretación de las interferencias. Pero fué en tres memorias correspondientes a los tres años siguientes donde YOUNG expuso ampliamente sus ideas y descubrimientos, todos favorables a la teoría ondulatoria de la luz. Esos trabajos no fueron acogidos con mucho entusiasmo, debido, en parte, al prestigio de la teoría de

las emisiones; en parte también, a cierta falta de rigor teórico-experimental de algunas de las demostraciones de YOUNG y, en fin, al hecho de no haber podido vencer a defensores de la teoría de las emisiones tan renombrados como LAPLACE, MALUS, POISSON, BIOT, BREWSTER, quienes se cubrían de gloria por el valor de descubrimientos sensacionales y de trabajos analíticos de gran profundidad, en el mismo campo de la óptica... La lucha era desigual, y YOUNG estaba a punto de abandonarla y de claudicar de sus convicciones.

Sin embargo, frente al descubrimiento o redescubrimiento de la polarización por MALUS, YOUNG se había empeñado en dar una explicación ondulatoria del fenómeno, y en el mes de enero de 1817, escribió a ARAGO una carta en la cual expresaba que consideraba perfectamente factible esta explicación, siempre que no se pensara en ondas *longitudinales* sino en ondas *transversales* o sea *perpendiculares a la dirección del rayo de luz*, tal como lo había imaginado, sin mayor fundamento, HOOKE, el irascible rival de NEWTON.

La obra de YOUNG contenía pues el germen completo de la obra de FRESNEL, ya que encerraba el núcleo original de esa magnífica obra, en sus dos aspectos: la explicación de las interferencias por el concepto ondulatorio escalar (con ondas longitudinales) y la sugestión de una explicación de la polarización por el concepto ondulatorio con ondas transversales.

No sin razón dijo HELMHOLTZ: «*Tuvo la mala suerte de adelantarse demasiado a su época... Sus ideas más importantes quedaron encerradas y olvidadas en las carpetas de la Sociedad Real hasta que una nueva generación...*» No anticipemos...

WOLLASTON (1766-1828). — Debe recordarse aquí al doctor WOLLASTON. Ese colega y compatriota de YOUNG, hombre original, generoso y de espíritu claro y práctico, fué el descubridor de los rayos ultravioletas y de las rayas del espectro llamadas de FRAUNHOFER, el in-

ventor además de la cámara clara, de una conocida pila, de un goniómetro y del crióscopo. Tan caracterizado sabio y feliz experimentador fué también partidario de la teoría de las ondulaciones longitudinales como consecuencia de una teoría propia de la doble refracción. Pero, pese a la valiosa ayuda de WOLLASTON, que sus compatriotas llamaban «el Papa» por su infalibilidad, YOUNG no logró triunfar frente a rivales tan poderosos como los franceses: LAPLACE, POISSON, BIOT y MALUS, y frente a su compatriota BREWSTER (1781-1868).

Malus — Biot — Brewster

MALUS (1775-1812). — De todos esos mariscales del ejército defensor de la teoría corpuscular, fué sobre todo MALUS quien más fortaleció sus posiciones ante los ataques de YOUNG y de WOLLASTON. En el Instituto del Cairo, del cual formara parte cuando acompañó a Bonaparte en la campaña de Egipto, MALUS había presentado un trabajo acerca de una teoría química de la naturaleza de la luz en que atribuía ésta a una combinación de oxígeno y «calórico». Esta hipótesis curiosa ya había sido defendida, en forma parecida, por el físico ruso PARROT. No insistiremos sobre este primer trabajo de MALUS, y llegamos al año 1807 cuando presentó a la Academia dos trabajos que merecieron la aprobación de los sabios de mayor renombre. Eran éstos el *Tratado de Óptica Analítica* y una *Memoria acerca del poder refringente de los cuerpos opacos*, cuya finalidad expresa era establecer «definitivamente» cuál de las dos teorías —de las emisiones y de las ondulaciones— es la verdadera.

Fué un triunfo para la teoría de las emisiones, pues MALUS, que para ello empleaba sin embargo el método de determinación del «opositor» WOLLASTON, ratificó las conclusiones que LAPLACE había deducido de la teoría de las emisiones acerca de la reflexión total en cuerpos diáfanos y opacos (1). La mayoría de los sabios y especial-

(1) P. F. SCHURMANN. *Historia de la Física.* Tomo II, páginas 73-79.

mente LAPLACE, HAUY, GAY LUSSAC, proclamaron el triunfo, mientras que ARAGO, futuro protector y partidario de FRESNEL, insinuaba ya ciertas objeciones. El prestigio y autoridad de MALUS se acrecentaron mucho más todavía a los pocos meses, cuando, en 1808, descubrió la polarización por reflexión y, al año siguiente, la polarización por refracción, creando así un nuevo y fecundo capítulo de la Física que ARAGO, BIOT y BREWSTER ampliaron de inmediato con importantes descubrimientos y observaciones sintetizadas en leyes de gran utilidad.

Aunque nos empeñemos aquí en resistir al peligro de desviarnos hacia la historia de la óptica en general, a fin de concretarnos a la historia de los conceptos acerca de la naturaleza de la luz, no se puede resistir al deseo de relatar la historia de este descubrimiento, pues es, por cierto, interesante y no ajeno a nuestros fines.

Ya dijimos que fué HUYGHENS quien descubrió la polarización, como un curioso estado especial de la luz al cual no dió nombre técnico, refiriéndose a él como «*fenómeno maravilloso*» que sólo señalaba «*para que otros busquen su causa*». Agregamos que NEWTON supuso que las moléculas luminosas eran parecidas a pequeños imanes con sus respectivos «polos»; esta explicación, admitida por los partidarios de las emisiones, aclara la etimología del término «polarización» que MALUS volvió a implantar y generalizar. En 1808, pues, la Academia de Ciencias abrió un concurso cuyo tema era: la teoría matemática y experimental de la doble refracción. El plazo era de dos años, pero MALUS presentó antes de finalizar el año su «memoria acerca de una propiedad de la luz reflejada por los cuerpos diáfanos» en que daba cuenta de su descubrimiento de la polarización en el curso de sus estudios de doble refracción. Al mismo tiempo confirmaba la ley de HUYGHENS sobre el rayo extraordinario pero expresaba que, como ya lo dijera LAPLACE, causaba mal efecto en la obra de HUYGHENS el enunciado de una ley exacta en medio de una teoría falsa. El descubrimiento de MALUS fué, hasta cierto punto, casual. Estudiando la doble refracción, en su casa, frente a la ventana, miraba a través

de un cristal birrefringente; dirigió éste hacia la luminosidad de rayos solares que reflejaban las ventanas del Luxemburgo y se sorprendió al descubrir que una de las dos imágenes experimentaba sensibles variaciones de intensidad cuando hacía girar el cristal. Después de esta polarización por reflexión, descubrió la polarización por simple refracción, y en el estudio de sus leyes llegó en repetidas ocasiones y con absoluta simultaneidad a conclusiones idénticas a las de sus «correligionarios en teoría de la luz», BIOT y BREWSTER.

Tales triunfos de la óptica, logrados por los defensores del concepto corpuscular, eran sin duda argumentos muy favorables al seguro mantenimiento de la autoridad y del prestigio de la teoría de las emisiones. Sin embargo...

Fresnel — Arago — Neumann

FRESNEL (1788-1827). — En 1814, un joven ingeniero francés que trabajaba en la construcción de un puente en Vendea, escribió a su hermano, radicado en París, para pedirle un tratado de física. Para motivar su pedido, le decía textualmente: «*He visto en el Moniteur que* BIOT *leyó en el Instituto una memoria muy interesante acerca de "polarización de la luz" y por más que me rompa la cabeza no adivino lo que pueda ser aquello...*»

El hermano del joven ingeniero, en quien ya habéis reconocido sin duda a AGUSTÍN FRESNEL, le envió entonces el libro de física que más se usaba en la época en su carácter de tratado adoptado por los establecimientos oficiales de enseñanza. Era el *Traité Elémentaire de Physique* del señor abate HAUY. Tengo ante los ojos un ejemplar de ese libro de HAUY, con el muy elemental material de información que suministrara al joven ingeniero, deseoso de profundizar el estudio de la física y predestinado a ser uno de los más gloriosos campeones de la lucha secular por el misterio de la luz.

Destacaremos rápidamente algunos extractos de esta obra en dos volúmenes, que dedica al estudio de la luz tres centenares de páginas en las cuales abundan, además de la información sucinta necesaria, las digresiones literarias y filosóficas. Entre otras generalidades acerca de la luz, señala las ventajas de su «marcha geométrica», que limita su estudio a un pequeño número de leyes con métodos precisos y rigurosos, y recuerda así que, gracias a ese carácter de la luz *«el célebre* SAUNDERSON, *aunque ciego desde su infancia daba lecciones públicas de óptica, pues consideraba los rayos de luz como simples líneas materiales que obraban sobre el ojo por contacto...»*

Nos suponemos que FRESNEL fué atraído inmediatamente por este capítulo titulado: *De la Naturaleza y Propagación de la Luz.* Saltando líneas, como también él lo hiciera tal vez en la nerviosidad de una primera lectura, encontramos estas afirmaciones:

«Un cuerpo visible supone necesariamente la existencia de un flúido cuya acción se ejerce sobre los objetos alumbrados y sobre el órgano que los percibe. ¿Este flúido es una materia sutil que llena toda la esfera del universo y a la cual el cuerpo luminoso imprime una agitación que se trasmite luego de punto en punto como las vibraciones del cuerpo sonoro se propagan por medio del aire? Tal es la hipótesis de DESCARTES, admitida por varios físicos modernos que, para adaptarla al fenómeno de la reflexión y de la propagación de la luz, le hicieron algunos cambios, suponiendo que las partículas de este flúido, en lugar de ser inflexibles y absolutamente contiguas —como lo pretendía DESCARTES— fueran elásticas, dejando entre sí pequeños intervalos? ¿Proviene, al contrario, la luz de una emisión o derrame de propias partículas del cuerpo luminoso, que lanza sin cesar en todo sentido por un efecto de la continua agitación que él mismo experimenta? En esta hipótesis, que es la de NEWTON, ocurriría con la luz, en cuanto a la manera de ser producida, como con los cuerpos olorosos y los corpúsculos que de ellos emanan...

...El sistema de DESCARTES fué adoptado por EULER, con la diferencia que señalamos más atriba y según la cual la materia de que depende la propagación de la luz, y que él llama «éter», estaría dotada de una elasticidad incomparablemente mayor que la del aire.

La opinión de HUYGHENS sobre la emisión de la luz entra dentro de la que acabamos de citar, pero el término de comparación con el cual relaciona esa emisión no es el mismo, pues la considera el efecto de un movimiento ondulatorio,, impreso por el cuerpo luminoso a la

materia etérea, semejante al que produce en el agua una piedra arrojada en ella...

Las dos hipótesis tienen a su favor autoridades de gran peso. Sin embargo, si se consideran bajo todos sus aspectos, no se puede negar la preferencia a la hipótesis de NEWTON.

...Todos los hechos que expondremos demostrarán cada vez más la hipótesis newtoniana...»

Algunas páginas más adelante, al estudiar la reflexión y la refracción, HAUY nos dice:

«NEWTON no se limitó siempre a las acciones a distancia (fuerzas de atracción) para explicar los efectos debidos a la reflexión y a la refracción. Él supuso que esos efectos podrían depender de la acción de una materia sutil, esparcida por todas partes y aun en el interior de los cuerpos diáfanos; y, concibiendo que esta materia tuviera más densidad en los cuerpos más raros y que su densidad aumentara poco a poco del medio denso al medio más raro, pensaba que se podría explicar por esa hipótesis como la luz se refracta en ciertas circunstancias y como se refleja en otras, intentando apartarse de los espacios en que la materia sutil es más densa para ir hacia aquellos donde sea más rara. Además no es extraño ver aquí a NEWTON darse esta especie de libertad en hacer conjeturas. Sólo propone sus opiniones como simples dudas en sus *Preguntas de Óptica*, en las cuales parece hacer la historia de los pensamientos que se presentaron sucesivamente a su espíritu en sus profundas meditaciones y a fin de invitar a los filósofos a discutirlos y dilucidarlos...»

Un poco más lejos, HAUY defiende el concepto de las «acciones a distancia» introducido por NEWTON y contra el cual veremos, más adelante, enfrentarse empecinadamente a FARADAY... Dice HAUY, que FRESNEL leyera con atención:

«La resistencia que tuvieron los físicos, y que algunos tienen aún, en admitir semejantes acciones sólo vienen de su tendencia a buscar acciones análogas a la de los cuerpos que chocan y los distintos móviles de la Mecánica. Esas acciones de contacto, análogas a las que continuamente se producen ante nuestros ojos, pueden ofrecer al espíritu concepciones más nítidas, aunque, en el fondo, la impulsión considerada con atención tiene tantos misterios como la atracción. Se acusa a los partidarios de las acciones a distancia de reproducir las cualidades ocultas de los antiguos filósofos; sin embargo, la diferencia es inmensa entre esas simpatías y antipatías que bastaba nombrar para explicarlo todo, y los principios actuales que expresan hechos generales...»

Cuando llega HAUY al fenómeno de los colores nos dice, tras las explicaciones generales y elementales:

«Pero para que un cuerpo refleje con preferencia tales o cuales rayos, debe haber algo que determine esa preferencia: ¿en qué pues difiere el cuerpo rojo del verde, amarillo o violeta? Se trató de contestar a esta pregunta con distintas hipótesis. NEWTON, que por su parte, se ocupó mucho de este tema interesante, interrogó la naturaleza con el éxito de siempre, en una serie de experiencias cuyos resultados daremos a conocer...»

Y aquí HAUY describe las experiencias de NEWTON sobre los anillos coloreados y reproduce sus numerosas medidas y reglas de relación entre las dimensiones y distancias de dichos anillos. Como explicación del fenómeno se limita a decir:

«NEWTON llama *accesos* o *regresos de fácil reflexión* las disposiciones sucesivas de un mismo rayo a ser reflejado por distintos espesores de una lámina de aire o de cualquiera otra sustancia, y *accesos* o *regresos de fácil trasmisión*, las disposiciones de este rayo a ser trasmitido por los espesores intermediarios. Así un rayo está en uno de sus regresos de fácil reflexión cuando cae sobre una lámina de cualquiera sustancia cuyo espesor es uno de los términos de la serie 1, 3, 5, 7, 9... tomando como unidad el espesor más pequeño capaz de reflejar ese rayo; y del mismo modo está en uno de sus accesos de fácil trasmisión cuando el espesor de la lámina que lo recibe es uno de los términos de la serie 2, 4, 6, 8...»

De allí, HAUY muestra cómo la explicación de los anillos coloreados puede ser aplicada a los colores atribuyendo a los cuerpos una constitución interna que permita asimilar sus moléculas o partículas y sus poros a láminas transparentes y espacios intercalados.

Pero la parte de la obra de HAUY que debía atraer particularmente la atención de FRESNEL era, como lo hemos visto por la carta de FRESNEL a su hermano, la explicación de la polarización. Después de presentar empíricamente la polarización por doble refracción y por reflexión, HAUY dice:

«Estamos ahora en condición de explicar lo que debe entenderse por *luz polarizada*. Razonaremos dentro de la hipótesis admitida por NEWTON, es decir que las moléculas de la luz tienen polos sobre los

cuales obran las moléculas de los cuerpos dotados de doble refracción atravesados por los rayos de dicho flúido. Entre esos cuerpos elegiremos como ejemplo el romboide de espato de Islandia. Vimos que cada uno de los dos haces emanados de la luz directa, a la cual se presentó uno de los romboides, no era ya susceptible, después de haber salido de él, de subdividirse al atravesar un nuevo romboide cuya sección principal era paralela o perpendicular a la del primero. Esta propiedad deriva de que, en virtud de la acción que el primer romboide ejercía sobre las moléculas de cada haz, ellas hacían girar, todas juntas, en un mismo sentido, los polos análogos a esa acción; de lo cual resultaba, en todos los rayos cuyo conjunto constituían el haz, una tendencia general y permanente a no sufrir más que una refracción al pasar por un segundo romboide, siempre que la sección principal de éste estuviese en una de las posiciones de que depende la acción de sus moléculas sobre la acción de las moléculas luminosas. El efecto del espejo que recibe los rayos bajo un ángulo de 35°25' es absolutamente el mismo, con relación a esos rayos, que el que produjo el primer romboide con relación al haz que sufrió refracción ordinaria al atravesarlo. Todos esos rayos tienen sus polos homólogos dirigidos en el mismo sentido; todos están dispuestos de la misma manera, de lo cual se desprende que el haz, que forma su conjunto, queda simple al penetrar en el romboide. Es la uniformidad de su disposición, dependiente del ángulo bajo el cual fueron reflejados por el espejo, lo que constituye el carácter distintivo de la luz polarizada...»

Estas citas del *Traité Elémentaire de Physique* del señor Abate HAUY, a las que ya concedimos una parte excesiva de nuestro reducido espacio, tienen para nosotros la virtud de hacernos apreciar la forma en que los problemas de la luz eran considerados y presentados en esa segunda década del siglo XIX, en el momento en que FRESNEL, cuya atención había sido atraída por la noticia de un «nuevo» fenómeno llamado «polarización», se «*rompía la cabeza para saber qué significaba aquello...*»

Llegó, pues, el texto de física, y, dos meses más tarde, el joven ingeniero, aislado en medio del campo, escribía nuevamente a su hermano y, en su larga carta, rebelándose contra las afirmaciones tan categóricas de la ciencia oficial presentadas por HAUY, levantaba valederas acusaciones contra la teoría de las emisiones y proclamaba su adhesión al concepto ondultorio.

Esta carta terminaba así: «...*Tú vives en la sociedad de sabios; si no lo alcanzas solo, puedes con su ayuda pul-*

verizar mis objeciones. Mientras tanto, te confieso que estoy tentado de creer en las vibraciones de un flúido particular para la transmisión de la luz y del calor. Se explicaría la uniformidad de la velocidad de la luz como se explica la del sonido, y se verían quizas en los cambios de equilibrio de ese flúido las causas de los fenómenos eléctricos...»

Como se ve, allí estaba señalado un programa de acción que nos lleva a través de todo el siglo XIX, pasando por MAXWELL y llegando a HERTZ...

Y entonces, de 1815 a 1826, durante once años, pues, FRESNEL libró un incesante combate a la teoría de NEWTON. La derrotó e instauró una óptica nueva; pero, ya victorioso, fué vencido por el esfuerzo y, joven aún, cerró los ojos a la luz cuyo secreto creía haber descubierto.

En 1817 respondió al llamado de la Academia de Ciencias que fijó como tema de un concurso el «Estudio teórico y experimental de los fenómenos de interferencia y de defracción». Allí ya proclamó con claridad su convicción de que la luz es el efecto de vibraciones periódicas, muy cortas, de velocidad enorme y variable de un medio a otro, y capaces de interferir entre sí. En 1818, presentó su célebre *Memoria sobre la difracción*, en la cual ya presenta una teoría equilibrada y amplia, y que fué premiada por la Academia de Ciencias debido a su «*constante acuerdo entre el cálculo y la experiencia, hasta en los detalles más minuciosos...*». SCHWERD dijo de esta memoria que, con ella, «*la teoría de las ondulaciones predice los fenómenos de difracción tan exactamente como la teoría de la gravitación predice los movimientos de los cuerpos celestes*».

FRESNEL estudió los fenómenos de difracción y los anillos coloreados como fenómenos de interferencias, pero no siguió el mismo camino de YOUNG, en cuya obra, además no se inspiraba. En la difracción, no creyó necesario combinar un rayo reflejado con un rayo directo, sino que, fundándose en la teoría de HUYGHENS, estudió la combinación de ondas elementales.

Estableció así las célebres «integrales de FRESNEL» y

halló una fórmula general que permite calcular todos los casos más variados de difracción.

Para las interferencias, realizó admirables experiencias y, con el fin de eludir las objeciones que se hacían al experimento de YOUNG, debido a la influencia que podían ejercer los bordes de los agujeros de la pantalla sobre la marcha de los rayos, FRESNEL imaginó el dispositivo de los espejos («espejos de FRESNEL») colocados en ángulo obtuso muy próximo a los 180°, de tal modo que las imágenes de un foco luminoso que en ellos se producen, cumplan el mismo papel que los agujeritos de la pantalla de YOUNG.

Con la teoría ondulatoria de HUYGHENS, o sea la teoría que atribuye la luz a ondas longitudinales de magnitud escalar, FRESNEL explicó perfectamente la propagación rectilínea de la luz debida a la pequeñez de sus ondas, y explicó la reflexión, la refracción, la dispersión, la difracción y las interferencias.

Su actitud general se diferencia claramente de la de sus predecesores en óptica por su abandono de los razonamientos puramente geométricos y mecánicos acerca de la marcha de los rayos y por su dedicación absoluta al estudio de la causa o sea de las vibraciones del medio elástico. VERDET veía en este aspecto de la obra óptica de FRESNEL la creación de un nuevo capítulo científico con la teoría general de la elasticidad, en que tanto brillaron CAUCHY, GREEN, POISSON y LAMÉ.

Una incidencia de la lucha merece ser destacada para demostrar cómo, en esas batallas científicas, una aparente derrota puede trocarse en una magnífica victoria: De la explicación de FRESNEL de la propagación de la luz en línea recta, el matemático POISSON (1781 - 1840), dedujo que si se coloca un pequeño disco entre una fuente luminosa puntual y un punto cualquiera a una distancia determinada, de tal modo que el disco sólo sea cubierto por la primera o las dos primeras zonas de media longitud de onda, ese punto debe ser luminoso a pesar de encontrarse en la sombra del disco. Y esta deducción lógica

parecía de por sí tan ridícula con la suposición de ese puntito luminoso encendido en medio de la sombra, que POISSON la presentó como clara demostración del fracaso del concepto ondulatorio. FRESNEL, después de haber comprobado la rigurosa exactitud del razonamiento de POISSON, aceptó el desafío planteado por la inesperada conclusión, y ARAGO, su colaborador, protector y amigo, vino en su ayuda demostrando experimentalmente la exactitud de la deducción teórica de POISSON: ¡En medio de la sombra, brillaba el punto luminoso!

La derrota que NEWTON había infligido a HUYGHENS había sido vengada por FRESNEL... Pero, como lo hemos visto, MALUS acababa de hacer revivir el olvidado descubrimiento de HUYGHENS del «maravilloso fenómeno» que fué llamado «polarización» debido a la explicación de NEWTON.

Los partidarios de las emisiones se habían visto en serios apuros para incluir en su teoría la polarización por reflexión y por refracción, así como los fenómenos de polarización circular y elíptica y de polarización cromática, magnífico conjunto de descubrimientos de reciente cosecha, realizados por un núcleo de sabios entre los cuales deben destacarse los nombres de MALUS, BIOT, BREWSTER, ARAGO, y el del mismo FRESNEL, pues éste intervino con ARAGO en el descubrimiento de la polarización cromática y descubrió y estudió, por su cuenta, la polarización circular.

Cada nuevo descubrimiento imponía a los partidarios de las emisiones ingeniosas enmiendas o agregados que, si bien resolvían momentáneamente el problema, hacían perder a la teoría en su conjunto las necesarias cualidades de una grande y equilibrada síntesis explicativa de todos los fenómenos luminosos conocidos. (Gran anhelo, por cierto, que no hemos logrado cumplir aún en nuestros días...).

Para la explicación de la polarización rotatoria y cromática BIOT imaginó así una hipótesis de «polarización movible», que supone una conveniente desviación de los planos de polarización de los diversos colores. FRESNEL,

mientras tanto luchaba afanosamente para lograr dar la superioridad a una nueva teoría de las ondulaciones por medio de la generalidad y la unidad de que carecía la muy remendada teoría de las emisiones.

Para explicar la polarización, tras una labor intensa de cinco años, en 1821, presentó la teoría de las ondas transversales y demostró que no podían existir simultáneamente ondas longitudinales y transversales, siendo así su teoría *sustitutiva* de la de HUYGHENS, y no *aditiva.*

Ya vimos que, en 1817, YOUNG había escrito a ARAGO que creía en la posibilidad de la explicación de la polarización por medio del concepto de las ondas transversales ya sustentado por HOOKE. FRESNEL había sido informado por ARAGO acerca de esta sugestión de YOUNG, pero mientras FRESNEL no intentó dilucidar los fenómenos de polarización, él se mantuvo adicto a las ondas longitudinales. Ahora se resolvía a abandonarla y destacó así la diferencia fundamental entre el sonido y la luz.

FRESNEL introdujo pues, con el concepto vectorial, una explicación matemática que satisfacía todas las exigencias del momento, y, para su explicación mecánica, siguió asimilando las ondulaciones luminosas a las vibraciones del éter.

La primera teoría de FRESNEL o «*teoría* ondulatoria escalar», que podemos llamar de «HUYGHENS - FRESNEL», lograba explicar la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción, fenómenos «neutrales» o sea igualmente explicables por la teoría de NEWTON; daba además satisfacción en la explicación de la dispersión, la difracción y las interferencias comprendiendo entre éstas los anillos coloreados. Pero la segunda teoría de FRESNEL, «teoría vectorial» logró comprender en la teoría ondulatoria los fenómenos de polarización que las ondulaciones longitudinales no podían explicar.

Esas teorías de FRESNEL le hicieron dar precisión a las cualidades del éter, medio con el cual lograba la representación mecánica del movimiento ondulatorio de la luz exactamente como lo hiciera HUYGHENS.

Seria sin duda una interesante, pero dilatoria digresión, extendernos aquí en el problema del éter, tan íntimamente unido al problema de la luz. Consideraciones acerca de la existencia o inexistencia del éter, acerca de las hipotéticas propiedades que las teorías distintas le imponen y, en fin, acerca de la posibilidad de considerarlo como el elemento mismo de toda la materia, podrían llevarnos demasiado lejos de nuestro tema. La historia del éter debería seguirse desde la antigüedad; luego se vería reaparecer con DESCARTES, en el mismo carácter de segundo elemento, mientras que en la época newtoniana se relacionó con posibles explicaciones de la atracción universal como lo hiciera LESAGE. HUYGHENS necesitó la hipótesis del éter como medio de las ondulaciones luminosas y le atribuyó las propiedades necesarias, y así hicieron todos los que intervinieron en el progreso del estudio de la energía radiante: HOOKE, YOUNG, FRESNEL, FARADAY, AMPÈRE, MAXWELL, HERTZ... Recordemos solamente aquí que FRESNEL consideró: que el éter penetra el globo terráqueo; que debe ser lo bastante rígido para ser capaz de producir vibraciones transversales comportándose pues como un sólido elástico; que su densidad es variable y su elasticidad constante; que es inmóvil aunque arrastrable por los cuerpos refringentes en movimiento, de acuerdo con la fórmula $\left(u = \frac{n^2 - 1}{n^2}\right)$ cuya exactitud fué ingeniosamente comprobada por FIZEAU. A todas estas afirmaciones de FRESNEL acerca del éter tendremos oportunidad de hacerles, más adelante, alguna referencia. Desde ahora vislumbramos las dificultades que pueden surgir, por ejemplo, de la representación de un medio de extrema rigidez en el cual, sin embargo, se mueven libremente los astros sin que esa rigidez sea obstáculo alguno.

En fin, la magnífica obra, teórica y experimental, de FRESNEL —que nos impone recordar el nombre de YOUNG, su precursor, y el de ARAGO, su incansable colaborador y defensor— significa todo un episodio de la historia de las

teorías de la luz y permaneció en pie durante todo el siglo XIX, y los grandes progresos que la óptica realizó durante esa centuria no hicieron sino destacar cada vez más la fecundidad del concepto que la inspiró y la perfección de los menores detalles de su desarrollo.

NEUMANN (1798-1895). — No modificó el espíritu de la teoría de FRESNEL la teoría presentada en 1835 por FRANCISCO NEUMANN. En efecto, mientras el sabio francés en su explicación de la reflexión y de la refracción suponía variable la densidad del éter y constante su elasticidad, el sabio alemán proponía la hipótesis inversa: densidad constante y elasticidad variable, siendo resultado de esta diferencia de hipótesis conclusiones distintas en cuanto a la dirección de las vibraciones de los rayos polarizados: para FRESNEL las vibraciones del rayo ordinario de la doble refracción son perpendiculares a la sección principal del cristal y las del rayo extraordinario le son paralelas, mientras que, según NEUMANN, ocurre a la inversa.

Ambas hipótesis, que dividieron las opiniones de los físicos, permiten explicar por igual los fenómenos ópticos de los cuales es imposible deducir pues argumentos decisivos a favor de uno u otro concepto. La hipótesis de FRESNEL fué generalmente mantenida sin embargo, porque permite explicar algunos fenómenos con mayor sencillez que la hipótesis de NEUMANN. Esto oposición de criterio no se tornó pues en ningún nuevo incidente perturbador, y la paz tan arduamente ganada, siguió reinando...

CAPÍTULO V

UNA NUEVA POLÍTICA

3er. EPISODIO: EL PLAN MAXWELL

1

TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

Faraday — Maxwell

FARADAY (1791-1867). — Tras larga lucha, reinaba la paz impuesta por el triunfo de la teoría ondulatoria, gracias al genio de FRESNEL...

Pero surgieron bien pronto, nuevos fenómenos ópticos; exigieron una síntesis más amplia de la naturaleza de la luz; y esa síntesis fué ofrecida por la teoría electromagnética de la luz propuesta por MAXWELL, sin imponer empero el abandono de la teoría de FRESNEL ni de sus magníficos triunfos.

Ya no hubo batalla, ni hubo vencido; se siguió una «nueva política», se adoptó «un nuevo plan».

Y aquí se inicia otra etapa, *el tercer episodio fundamental de la historia de la luz*, etapa renovadora para la historia de la física en general, episodio cuyas hermosas consecuencias y derivaciones quisiera poder señalar aquí; pero, por razones de espacio, debemos limitarnos a escoger entre tantos experimentos admirables y razonamien-

tos excelsos sólo algunos de los más imprescindibles para este rápido delineamiento de la evolución de la síntesis de la luz.

Volvamos unos años atrás...

Mientras FRESNEL edificaba su teoría ondulatoria, un joven obrero encuadernador de Londres, a fuerza de sacrificios y de voluntad, lograba hacerse distinguir por el gran químico DAVY (1778-1829), quien lo empleó como ayudante de laboratorio y se hizo acompañar por él en sus viajes científicos por el continente, dándole en esa oportunidad funciones de ayudante y hasta de criado. Ese joven empeñoso y humilde se llamaba MIGUEL FARADAY (1791 - 1867), y llegó a ser el más ilustre de los experimentadores.

Entre sus numerosos y trascendentales descubrimientos de electricidad y de química, sólo nos cabe recordar aquí su descubrimiento, realizado en 1845, de la rotación del plano de polarización de la luz cuando ésta se propaga en un cuerpo refringente dentro de un campo magnético. El trabajo que redactó al respecto se titulaba: *Memoria acerca de la magnetización de la luz y de la iluminación de las líneas de fuerza magnética.*

No era éste un descubrimiento casual de FARADAY: era el comienzo de la realización de su ensueño científico, la comprobación de su fe en la identidad de origen de todas las fuerzas de la naturaleza, en un concepto único del Universo.

¡Cuán lejano y anticuado nos parece hoy en día ese bello sueño de FARADAY! ¡Qué distante y distinto de nuestra angustiosa «incertidumbre» que hoy domina tanto nuestro espíritu científico que la atribuímos como cualidad intrínseca a la misma naturaleza! Aun aquellos, más prudentes o más sumisos a los prejuicios del viejo «buen sentido», aun aquellos que resisten admitir el «indeterminismo» como principio, sonríen ahora ante la genial ingenuidad de aquel sueño o lo tildan, como RUSK de «peligrosa acrobacia filosófica».

Así como AMPÈRE (1775 - 1836), en gesto genial y espontáneo, había reunido la electricidad y el magnetismo (1820), FARADAY estableció el primer contacto entre el electromagnetismo y la luz.

Otro de los ideales de ese gran experimentador era la abolición del concepto de NEWTON de la «acción a distancia», y este ideal lo realizó cuando concibió las «líneas de fuerza», es decir verdaderas tensiones dentro del campo eléctrico o magnético, asignando pues una influencia primordial al ambiente.

En 1846, en el final de una conferencia algo improvisada pronunciada por FARADAY, emitió algunos «Pensamientos sobre vibraciones de los rayos», y con ellos sugirió la posibilidad de crear una teoría electromagnética de la luz con prescindencia de la hipótesis del éter. Dijo en aquella oportunidad: «*El punto que yo deseaba destacar para la consideración del auditorio era la posibilidad de que las vibraciones mediante las cuales una determinada teoría (la de* FRESNEL*), explica los fenómenos radiantes y la radiación misma, se produzcan en las líneas de fuerza que vinculan entre sí partículas, es decir, masas materiales. Esta idea, hasta donde pueda ser admitida, permitía prescindir del éter que otras concepciones interpretan como el medio en el cual tienen lugar estas vibraciones... La idea que me atrevo a adelantar considera a la radiación como a una vibración de naturaleza superior, localizada en las líneas de fuerza que, como bien se sabe, conectan entre sí partículas y masas materiales. Esta noción permite prescindir del éter, pero no de las vibraciones...*». Prosiguiendo el razonamiento considera la polarización como una vibración transversal a lo largo de las líneas de fuerza. Vemos pues allí un claro esbozo de teoría electromagnética de la luz, que, por cierto, y pese a la idea de prescindencia del éter, se une perfectamente con las sugestiones de FRESNEL que citamos anteriormente y contenidas, en la iniciación de sus trabajos, en una carta a su hermano: «*Estoy tentado de creer en las vibraciones de un flúido particular para la transmisión de la luz y del calor... y se verían quizás en los*

cambios de equilibrio de ese flúido las causas de los fenómenos eléctricos...».

FARADAY no era matemático, era un filósofo experimental, y fué su amigo y compatriota JAIME CLERK MAXWELL (1831 - 1879), quien dió interpretación matemática a sus conceptos y luego, con visión genial, edificó sobre esa interpretación la teoría electromagnética que comprende a la luz como uno de sus capítulos.

MAXWELL (1831-1879). — Fué en 1867, año mismo de la muerte de FARADAY, su inspirador, cuando MAXWELL presentó su primera memoria acerca de la teoría electromagnética, teoría que desarrolló ampliamente en 1873. En ella se descubre un espíritu nuevo, que aun flota en nuestra ciencia actual y muy particularmente en el célebre laboratorio Cavendish de Cambridge donde sucedieron a MAXWELL: RAYLEIGH, J. J. THOMSON y RUTHERFORD.

Dijo MAXWELL entonces, recordando las ideas de FARADAY: «*La concepción de la propagación de perturbaciones magnéticas transversales, con exclusión de las normales, ha sido claramente formulada por el profesor* FARADAY *en sus* Pensamientos sobre Vibraciones de Rayos. *Su teoría electromagnética de la luz, tal como la propuso, es, en esencia, igual a la que yo he comenzado a desarrollar, con la excepción de que, en 1846, no se conocían los datos que permitieran calcular la velocidad de propagación*».

Nada más difícil, si no imposible, que resumir en una breve síntesis, en una explicación elemental, esa enorme teoría, compleja, fraccionada e inconexa, teoría matemática que admite la posibilidad de numerosas explicaciones mecánicas sin señalar ninguna.

Una de sus consecuencias más generales y sencillas es que el éter, al cual FARADAY y MAXWELL dan así enorme importancia, es sede de dos campos: el eléctrico y el magnético, siendo cualquiera de ellos causante del otro siempre que sufra la menor variación. (En la inducción de FARADAY es la variación del campo magnético lo que produce el campo eléctrico. En la «corriente de desplazamiento» de MAXWELL se produce el fenómeno inverso).

Según HERTZ (1857 - 1894) —genio excelso que dió a la obra de MAXWELL el magnífico florecimiento que todos conocemos— la teoría electromagnética está encerrada en seis ecuaciones, en un sistema de ecuaciones que sintetiza todos los hechos eléctricos y magnéticos conocidos y al cual MAXWELL dió aún mayor alcance y mayor fuerza sintética aboliendo toda diferencia entre los circuitos cerrados y los circuitos abiertos por medio del concepto de las «corrientes de desplazamiento», concepto fundado también en las ideas de FARADAY sobre los dieléctricos y, especialmente, en lo que llamó la «absorción eléctrica».

De ese sistema de ecuaciones y de las corrientes de desplazamiento, MAXWELL dedujo que toda carga oscilante debe provocar deformaciones en el éter, que esas deformaciones se propagan con ondas transversales con velocidad determinada, y que esta velocidad debe ser igual a la relación (c) existente entre las unidades electrostáticas y electromagnéticas, relación que resultó ser igual a la velocidad de la luz. Y MAXWELL interpretó con genial claridad esta «coincidencia».

También dedujo MAXWELL de su sistema de ecuaciones que, en un cuerpo refringente, el factor K, es decir: la «constante del dieléctrico», es igual al cuadrado del índice de refracción. ¡Nueva «coincidencia»!

Tanto la rotación del plano de polarización de la luz por el campo magnético, descubierto por FARADAY, como la igualdad entre la velocidad de propagación de las perturbaciones electromagnéticas y la velocidad de la luz, como la relación entre la constante dieléctrica y el índice de refracción, eran analogías que inducían a creer que la luz puede ser considerada como una perturbación electromagnética, y que la teoría de la luz debe estar comprendida pues dentro de ese sistema de ecuaciones que sintetiza la teoría electromagnética.

Dijo MAXWELL en su *Tratado de Electricidad y Magnetismo* (1873): «*En varias páginas de este tratado se intentó explicar los fenómenos electromagnéticos por una acción mecánica trasmitida de un cuerpo a otro por el intermediario de un medio. La teoría ondulatoria de la luz*

también supone la existencia de un medio. Lo que nos queda por mostrar es que el medio electromagnético tiene propiedades idénticas a las del medio en que se propaga la luz... Llenar el espacio con un nuevo medio cada vez que sea menester explicar un nuevo fenómeno no sería un procedimiento muy científico. Pero, al contrario, si, habiendo llegado independientemente, por el estudio de dos ramas distintas de la ciencia, a la hipótesis de un medio, y si las propiedades que deben ser atribuídas a ese medio para dar cuenta de los fenómenos electromagnéticos resultan ser de la misma naturaleza que los que debemos atribuir al éter luminoso para poder explicar los fenómenos de la luz, entonces nuestras razones de creer en la existencia física de semejante medio se encuentran así confirmadas...»

En cuanto al concepto del éter es interesante observar, como lo expresa JORDAN en su *Física del siglo* XX, que *«fué la influencia de los descubrimientos de* MAXWELL *lo que indujo cada vez más a los físicos a considerar estéril y superfluo todo el problema de un modelo mecánico del éter»*, *«porque»*, agrega JORDAN, *«si es posible predecir el resultado de cualquiera experiencia electrodinámica que se pueda concebir, si los fenómenos menos electromagnéticos pueden ser dilucidados matemáticamente tan fácilmente como los de los movimientos del sistema planetario, entonces ¿qué más podemos desear?»*

Empero, esa magnífica realización del ideal de FARADAY efectuada por MAXWELL, debido a lo complejo de su expresión matemática y a su falta de representación mecánica determinada, no habría triunfado tal vez si la sensacional comprobación de la propagación de las ondas electromagnéticas, realizada por HERTZ, en 1888, no hubiera dado la clara prueba experimental de las conclusiones teóricas de MAXWELL.

Además de esta comprobación, la teoría electromagnética de la luz se fortaleció cuando se volvió imprescindible para poder reunir en una sola síntesis todos los fenómenos ópticos explicados por la teoría vectorial de FRESNEL (propagación rectilínea, reflexión, refracción, dispersión, interferencias, difracción y polarización) conjuntamente

con todos los fenómenos magneto - ópticos y electro-ópticos, como la rotación magnética de FARADAY, a la cual se fueron agregando: el fenómeno de KERR (1875), o sea la doble refracción accidental, el efecto de KERR (1876), o sea: la rotación del plano de polarización por reflexión de un polo de imán; el efecto ZEEMAN (1896) que demuestra la acción del campo magnético sobre la onda luminosa con la descomposición de rayas de espectros de emisión; el fenómeno COTTON y MOUTON, de birrefringencia en el campo magnético.

No olvidemos pues que la teoría de MAXWELL, vasto capítulo de la ciencia, emancipado de la mecánica por la originalidad de su dominio racional, y de vasta extensión en todas las disciplinas de la ciencia, admite y comprende en su amplia síntesis, además de los fenómenos electro-ópticos, a la teoría ondulatoria de FRESNEL, y dió al vector de FRESNEL un contenido físico, ya que, en ella, éste se vuelve el vector eléctrico del par electromagnético.

Llegado a este punto, convendría detener un instante el curso de nuestra lectura para volver a contemplar el cuadro esquemático de la evolución de las teorías de la naturaleza de la luz y apreciaremos así cuántos sectores de fenómenos ópticos logró abarcar la teoría de MAXWELL.

La teoría de MAXWELL, además, tanto como la teoría de FRESNEL, sólo explica la propagación de la radiación en el éter, pero no estudia la forma en que la materia existe y luego absorbe esas ondas, de las cuales esa materia es fuente y receptor. Veremos, sin embargo, cómo, muy pronto, un desarrollo de los conceptos de FARADAY, MAXWELL y HERTZ permitirá echar este necesario «puente entre la materia y el éter».

No olvidemos tampoco, ya que el punto es de fundamental interés en este estudio de las teorías acerca de la naturaleza de la luz, que la teoría de MAXWELL afirmó la identidad de los fenómenos ópticos y electromagnéticos, aunque no diera explicación ni imagen de su naturaleza. Orientó lógicamente nuestro anhelo de explicación de la luz hacia el campo de la electricidad, y es así que, en 1895...

2

LORENTZ (1853-1928) Y EL ELECTRÓN

En 1895, el físico holandés ANTÓN LORENTZ instituyó la teoría de los electrones. He aquí todo un capítulo de la física, cuya historia, con sus antecedentes y orígenes, exigirá muchas nuevas páginas, no ajenas por cierto al tema de las teorías de la naturaleza de la luz que aquí nos ocupa. Sin embargo, debemos resistir al deseo de penetrar en el estudio detallado de este interesantísimo tema de historia de la física, a fin de no apartarnos del trazado central de este esquema tan sintético de «nuestro» estudio, con derivaciones hacia sectores contiguos, por estrechas que sean las relaciones que los unan con el problema de la luz.

Limitémonos pues a las palabras indispensables que puedan servir de puntos de referencia para quienes recuerdan o para quienes se dispongan a conocer ese otro capítulo de historia de la ciencia, que, con la física nuclear, conducen a los problemas más palpitantes y sensacionales de la hora presente.

Acabamos de decir que, con la teoría de MAXWELL, el problema de la luz se había orientado hacia el campo de la electricidad. La historia de la electricidad se vuelve asimismo un poco la propia historia de la luz. No tan así, tal vez, en el primer período de la historia de la electricidad, que corresponde al concepto de los dos flúidos y que se extiende del principio del siglo XVIII hasta 1835 (FARADAY) o 1870 (MAXWELL); pero sí en el segundo período, consecuencia de la obra de FARADAY o de su tan genial ampliación por MAXWELL, con la búsqueda de la explicación de los fenómenos eléctricos en el éter; y más aun, en el tercer período, el de la teoría electrónica, iniciado en 1895, pues ésta es, a la vez, teoría de electricidad y teoría de luz.

Sin embargo, los orígenes del concepto de la constitución corpuscular de la electricidad deben buscarse muy le-

jos si nos conformamos con vagos indicios; y puede hallarse con mucha mayor precisión en el año 1750, en la teoría de FRANKLIN, abundante en afirmaciones, nítidas aunque especulativas, acerca de la materialidad de la electricidad y de su constitución atómica. Deberíamos citar a FARADAY, que señaló la vía y siguió otra, con igual valor y genio. Pero el más seguro y evidente punto de partida de la teoría electrónica moderna, podemos fijarlo en el tercer cuarto del siglo XIX, y desde allí podemos observar su verdadera gestación conceptual en WEBER (1875), HITTORF, HELMHOLTZ (1881), W. THOMSON (LORD KELVIN), ARRHENUIS (1887), ELSTER y GEITEL (1888), GIESE (1889), RICHARZ (1894), STONEY (1894), LARMOR y WIECHERT (1896), RIECKE, DRUDE, DU MOND, RUTHERFORD, VOIGT, J. J. THOMSON, BOHR, LANGEVIN, PERRIN, VILLARD, RICHARDSON, TOWNSEND, H. A. WILSON, C. T. R. WILSON, MILLIKAN, COTTON, COMPTON, ASTON, BOTHE, BECKER, KAUFMANN, LINDEMANN, UHLENBECK, GOUDSMITH, los CURIE, JOLIOT, CHADWICK, MAURICIO y LUIS DE BROGLIE, DACOS, FLETCHER, THIBAUD, ANDERSON y, sobre todo, LORENTZ, quien, desde 1880, enunció claramente el concepto del átomo de electricidad y quien fué el primero en buscar en el concepto electrónico el mecanismo íntimo de la luz.

La teoría electrónica se impuso en electricidad como solución salvadora frente a «incidentes» cuyo apaciguamiento no lograba obtener la teoría de MAXWELL.

Entre los principales de esos incidentes, recordemos: los descubrimientos de CROOKES sobre rayos catódicos y sus muchas consecuencias; los experimentos de HERTZ sobre el efecto de los rayos ultravioletas en cuerpos electrizados (efecto fotoeléctrico); la emisión de electricidad por los cuerpos incandescentes llamada «emisión termoelectrónica» o «efecto Edison», que recuerda un célebre experimento de este ingenioso inventor; nuevos fenómenos de óptica magnética y especialmente el que descubrió ZEEMAN y que evidenció la influencia del campo magnético sobre el espectro.

La teoría electrónica, en fin, resultaba también un «plan conciliatorio», pues reunía en forma muy conciliatoria el concepto antiguo del flúido eléctrico tal como lo representaba FRANKLIN, con la teoría de FARADAY, MAXWELL y de HERTZ, o sea con la teoría del éter. Su misión conciliatoria significaba echar «el puente entre el éter y la materia» y también entre la electricidad y la luz.

Volvamos pues a «nuestro tema», destacando, en el conjunto de la teoría electrónica, tal como le dió su presentación inicial LORENTZ, la parte directamente relacionada con la luz. MAXWELL hizo de la luz un fenómeno electromagnético, el efecto de una vibración electromagnética que tiene al éter como medio de propagación, pero como ya lo dijimos, no explicó cómo nace esta vibración en la materia ni cómo muere en ella.

Fijaos bien cómo LORENTZ establece los dos puentes que acabo de nombrar.

Señala los electrones como la causa de las propiedades electromagnéticas de la materia. Considera que cada átomo material tiene un centro de acción que retiene a los electrones solicitados por acciones eléctricas exteriores y que los restablece en su posición cuando estas acciones cesan. Esto es lo que ocurre en los dieléctricos, donde los electrones están fijados al átomo, mientras que en los buenos conductores, en los metales, electrones libres ambulan libremente en los espacios interatómicos, siendo orientados y llevados por la fuerza electromotriz que llamamos «corriente eléctrica».

FARADAY nos mostró que, cuando una carga eléctrica se mueve en el éter con movimiento uniforme, lleva consigo su campo eléctrico y su campo magnético de acción localizada a su alrededor. Pero vemos ahora que las ondas electromagnéticas —y, por consiguiente, la luz y toda radiación— aparecen cada vez que se produzca un cambio en el estado de movimiento de un sistema de electrones, *tanto para un cambio de velocidad como de dirección;* y, según el carácter de esa aceleración de los electrones, cambia el tipo de onda producida (desde las ondas hertzia-

nas hasta los rayos X y rayos gama, pasando por el calor radiante y la luz).

Estas ondas electromagnéticas, en fin, emitidas por la materia, y que constituyen en el éter en que se propagan un campo electromagnético, son absorbidas por la materia con que chocan, materia que es así, según lo expresa LANGEVIN, «*fuente y receptáculo de las ondas luminosas*».

Y LANGEVIN agregaba a manera de conclusión de su informe en el Congreso de San Luis de 1904: «*Cayendo en un terreno admirablemente preparado para recibirlo, en el éter de* FARADAY, *de* MAXWELL *y de* HERTZ, *la noción de electrón, centro electrizado móvil, que la experiencia nos permite hoy captar individualmente, que constituye el lazo entre el éter y la materia formada por un agrupamiento de electrones, esta noción adquirió en pocos años un inmenso desarrollo que le hace quebrar los cuadros de la vieja física y alterar el orden establecido de las nociones y de las leyes... para llegar a una organización que se prevé simple, armoniosa y fecunda*».

Todos los fenómenos electroópticos y magnetoópticos que señalamos más arriba como ampliando el campo de acción de la teoría electromagnética de MAXWELL de la luz, encontraron en la teoría electrónica de LORENTZ explicaciones cualitativas y cuantitativas magníficamente ajustadas a las observaciones experimentales.

El problema, pese a sus grandes líneas de ordenamiento, estaba muy lejos, sin embargo, de una solución definitiva, tanto en sus precisiones cuantitativas como en el aspecto conceptual.

EMILIO PICARD (1) señala claramente el conflicto conceptual que la misma solución MAXWELL - LORENTZ insinúa cuando dice: «*Con el éter de* MAXWELL *y los electrones que en él se mueven, las doctrinas de emisión y de ondulaciones se superponen en algún modo; no es sino el principio de una dualidad que va a acentuarse cada vez más*».

(1) PICARD. *Un coup d'œil sur l'Histoire des Sciences et des Théories Physiques.* (1930).

LORENTZ debió vencer grandes dificultades para adaptar la teoría electromagnética destinada a la explicación de fenómenos macroscópicos, a los fenómenos microscópicos relacionados con el mundo de los electrones. Vencidas esas primeras dificultades, otras, cada vez mayores, surgieron, creadas por los nuevos conceptos del siglo XX: fueron las numerosas «anomalías» del efecto ZEEMAN, fué la «ley de las frecuencias» de BOHR, fué el fotón... La teoría de la relatividad, con toda su originalidad de conceptos, no resultó ser, sin embargo, un obstáculo más, sino que vino a reforzar la teoría electromagnética de MAXWELL-LORENTZ, proporcionándole soluciones satisfactorias para varios problemas. Pero no nos anticipemos, ni nos alejemos de lo que se refiere estrictamente a «nuestro tema»...

3

HACIA LA FÍSICA NUEVA

A fines del siglo XIX, podía creerse que la física había completado su campaña en las regiones de la luz, en ese mundo de las ondas donde parecía reinar un orden imperfectible. Desde las ondas de 50 kilómetros de longitud hasta las ondas de un décimo de milésimo de millonésimo de milímetro, todas las ondas se escalonaban en perfecta continuidad y graduación: ondas hertzianas, radiaciones infrarrojas, luz visible desde el rojo hasta el violado, radiaciones ultra-violetas, rayos X y radiaciones de los cuerpos radioactivos.

Y es así que HERTZ escribía en 1889: «*¿Qué es la luz? Desde la época de* YOUNG *y de* FRESNEL, *sabemos que es un movimiento ondulatorio. Conocemos la velocidad de las ondas, conocemos su longitud, sabemos que son transversales; en una palabra, no ignoramos nada de las relaciones geométricas de esos fenómenos. No es posible expresar una duda sobre la validez de esos resultados y una*

contradicción sobre esos puntos es inadmisible para el físico. La teoría ondulatoria es una certeza, humanamente hablando».

Y MILLIKAN dice: *«Para 1900, la teoría ondulatoria se hallaba, aparentemente, convertida en una fortaleza inexpugnable».*

Volviendo a nuestro símil anterior entre las teorías físicas y las conferencias diplomáticas, podemos afirmar pues que, en el final del siglo XIX, la paz parecía asegurada, ya que todas las incidencias como la polarización y los fenómenos electroópticos, habían sido resueltas satisfactoriamente por el «Plan FRESNEL» ampliado con el «Plan MAXWELL», a su vez concretado con el «Plan LORENTZ». Pero en ciencia, como en política internacional, no podemos fiarnos en la estabilidad de la paz ni en la eficacia de los «planes»; y pronto surgió el incidente perturbador al cual la aplicación de los «planes FRESNEL-MAXWELL-LORENTZ» no podía presentar ya solución satisfactoria. Ese nuevo incidente fué el «efecto fotoeléctrico», y con él damos un paso de gigante hacia adelante, pues penetramos en la Física Nueva, y damos también un paso atrás, o, mejor dicho, echamos una mirada hacia atrás, pues volvemos a contemplar de repente el olvidado concepto corpuscular de la luz.

Partiremos ahora de este incidente perturbador del efecto fotoeléctrico para seguir la evolución de la síntesis de la luz en la Física Nueva y esbozaremos así *un nuevo episodio* de esa larga lucha de conceptos, episodio caracterizado por el advenimiento del «fotón» y luego por la «mecánica ondulatoria» y fuertemente ligado con la «mecánica cuántica», íntimamente unida a su vez con el problema del atomismo moderno.

En fin, con el estudio de este episodio de palpitante actualidad de la historia de la óptica, penetramos en las misteriosas regiones de la Física Nueva, ahora dominios de simbolismos matemáticos y de conceptos epistemológicos que acaban de invadir esas posesiones de la Física Clásica. En nuestra incursión en esas regiones peligrosas,

nos limitaremos a seguir las huellas que trazaron los mismos «conquistadores»; pero ellos se sirvieron de un instrumental matemático del cual no podemos pretender hacer uso, por más que un autor afirmara que resultaba mucho más fácil aprender las matemáticas que empeñarse en entender la Física Nueva sin conocerlas.

Nuestra labor se limitará, pues, a una síntesis de las exposiciones fundamentales o aun de otras exposiciones sintéticas, como las que figuran en nuestra nota bibliográfica, al final de este estudio.

CAPÍTULO VI

UN NUEVO ORDEN

4º EPISODIO: LA FISICA NUEVA

MÁS ADELANTE... DENTRO DEL MISTERIO

En el capítulo del siglo XIX, acabamos de ver cómo, precedido por el admirable aunque imperfecto empeño de YOUNG, FRESNEL logró hacer triunfar sobre el concepto corpuscular newtionano, universalmenmente admitido y defendido tenazmente por los más grandes sabios de la época, el concepto de las ondulaciones, presentado primero bajo el aspecto escalar con ondas longitudinales como lo propusiera HUYGHENS y luego bajo el aspecto vectorial, con ondas transversales. La teoría electromagnética de MAXWELL, o de FARADAY - MAXWELL - HERTZ, comprendió las ondulaciones estudiadas por FRESNEL en el vasto plan de las ondulaciones electromagnéticas y en su medio, el éter. LORENTZ, con el electrón, unió el éter con la materia y la luz con la electricidad con fuertes lazos y una íntima penetración de los fenómenos.

Un nuevo incidente, el «efecto fotoeléctrico», impone un nuevo giro a este episodio FRESNEL - MAXWELL - LORENTZ, y da principio al actual episodio de la Física Nueva.

1

EFECTO FOTOELÉCTRICO

Mientras LORENTZ elaboraba la teoría electrónica, el joven sabio alemán HERTZ (1857 - 1894) se dedicaba a la profundización analítica y a la demostración experimental de la teoría de MAXWELL. Logró lo primero, ampliamente, en un trabajo que debía ser su mejor obra teó-

rica, en el año 1884, con su *Memoria sobre las relaciones entre las ecuaciones fundamentales de* MAXWELL *y las Ecuaciones de la Electrodinámica.* Logró lo segundo, tan ampliamente y mucho más sensacionalmente, en 1887-1888, con sus célebres experimentos de Karlsruhe en que, con dos viejas espirales, construyó un excitador y un detector de ondas electromagnéticas, no limitándose a asombrar el mundo con la demostración tangible de esta maravillosa presunción teórica, sino realizando numerosos experimentos en los cuales manejaba las ondas electromagnéticas como si fueran rayos de luz...

Durante esas experiencias, en 1887, HERTZ observó un curioso fenómeno: la chispa producida en el resonador variaba de longitud y de brillo cuando estaba expuesta a la luz de la chispa del excitador. No se trataba de una influencia eléctrica; la simple intercepción de la luz por medio de una pantalla bastaba para anular el fenómeno.

HERTZ comprendió perfectamente que se encontraba frente a un fenómeno activo - eléctrico de real interés científico, pues denunciaba novísimos lazos entre la luz y la electricidad. Repitió y extendió las experiencias; descubrió que eran las radiaciones más refrangibles, violetas y ultravioletas, las que producían el fenómeno y que éste podía también obtenerse con electricidad de potencial menos elevado y con fuentes luminosas de otro origen, ricas en radiaciones muy refrangibles. Todo esto quedó ampliamente relatado en su *Memoria sobre la Influencia de la Luz Ultravioleta sobre la Descarga Eléctrica,* presentada en 1887.

HALLWACHS, WIEDEMANN y EBERT prosiguieron las investigaciones acerca de este fenómeno que se llamó «efecto de HERTZ» o «efecto fotoeléctrico». Se descubrió así que la luz favorece la descarga negativa del cátodo; o sea que cuando se alumbra un conductor con radiación de corta longitud de onda, éste se carga positivamente.

Mientras tanto, la teoría electrónica de LORENTZ progresaba; y el efecto fotoeléctrico, en medio de los muchos

descubrimientos sensacionales de ese período prodigiosamente privilegiado de la historia de la física, pudo ser explicado como una emisión de electrones separados de sus átomos por la energía de la luz que la materia absorbe. Pero para ello, debemos llegar a J. J. THOMSON y a LENARD, en 1899, sin olvidar que, en el tiempo intermedio, se habían realizado, entre otros maravillosos descubrimientos, el de los rayos X, en 1895.

Sabemos que parte de la energía cinética de los electrones proyectados sobre obstáculos, bajo forma de rayos catódicos o de cualquier otro rayo, se transforma en ondas electromagnéticas de alta frecuencia: son éstos los rayos X.

Pero este fenómeno es recíproco. De la misma manera que los electrones en movimiento (rayos catódicos), puedan provocar la formación de ondas electromagnéticas (rayos X), estas ondas electromagnéticas pueden a su vez transformarse, al chocar con un metal, en la energía cinética de electrones en movimiento, creando así rayos catódicos secundarios, que, al chocar con otro anticátodo, pueden nuevamente provocar rayos X. Se repite así una serie de intercambios de corpúsculos - ondas

Pero no son los rayos X las únicas ondas electromagnéticas capaces de proyectar electrones desde su choque con un metal; la luz visible y las luz invisible ultravioleta gozan de idéntica propiedad: es éste el efecto foto-eléctrico, el fenómeno descubierto por HERTZ, el fenómeno que había de ser bien pronto el incidente perturbador de la paz que parecía reinar serena y duradera, en ese agitado mundo conceptual de la teoría de la luz.

La única diferencia existente entre movimientos de electrones provocados por rayos X o por la luz es que si las frecuencias de las vibraciones luminosas son 10.000 veces menores que las de los rayos X, la energía que la luz comunica a los electrones será también 10.000 veces menor.

Surgió entonces un hecho de fundamental importancia, cuando, en 1902, LENARD y otros físicos demostraron experimentalmente que el desprendimiento de electrones, en el momento de la absorción de la luz u otra radiación por la materia, es absolutamente independiente de la *in-*

tensidad de la onda electromagnética que lo provoca y sólo depende de la *frecuencia* de ésta, además de la naturaleza del cuerpo irradiado.

En el caso especial del efecto fotoeléctrico, éste resulta así independiente en absoluto de la intensidad de la luz; y, por débil que ésta sea, siempre provoca liberación de electrones en el metal alcanzado, *cada vez que la frecuencia de las vibraciones luminosas sea suficiente para determinar dicha liberación.*

La observación de LENARD fué considerada faltal para la teoría de las ondulaciones, y con razón, pues, si admitimos esta teoría, resulta fácil demostrar que, alejando suficientemente el metal sobre el cual proyectamos la luz de la fuente luminosa, la onda luminosa, en la cual la energía se supone repartida uniformemente, no lograría traer *de una vez* a uno de los puntos del metal toda la energía necesaria para provocar liberación electrónica.

Decididamente, la imagen ondulatoria de la luz que nos ofrece la teoría HUYGHENS - FRESNEL, que la teoría de MAXWELL nos permitió perfectamente conservar con idéntica o mayor fe que antes, ya no satisfacía, pues no permitía comprender el mecanismo de este fenómeno de absorción de las radiaciones por la materia, de ese «efecto fotoeléctrico», descubierto por el mismo HERTZ, el gran campeón de las ondas electromagnéticas.

Si la imagen de la onda, en cuyo frente se distribuye continua y uniformemente la energía luminosa, no lograba explicar que, con cualquiera intensidad, por pequeña que fuese, se pueden desprender electrones siempre que la frecuencia fuera la necesaria, era lógico pensar en la posibilidad de una explicación del hecho por una distribución discontinua de la energía luminosa en los corpúsculos.

El concepto corpuscular, en efecto, explica fácilmente esa independencia entre la intensidad de la luz y el desprendimiento electrónico, pues, si bien es verdad que el alejamiento de la fuente luminosa hará cada vez menos probable el encuentro de un punto determinado del cuerpo por un corpúsculo de luz, cuando este encuentro se realice, provocará indefectiblemente la liberación electrónica,

porque cada corpúsculo transporta una cantidad fija y determinada de energía, cantidad suficiente para dicha liberación, cantidad no *distribuída* como en las ondas, sino *reunida* en el corpúsculo, y cantidad de energía tanto mayor cuanto mayor sea la frecuencia de sus vibraciones, como acabamos de verlo al comparar la actuación de los rayos X y de la luz visible.

El amplio lamido de la onda sobre la materia, con que logramos explicar todos los fenómenos luminosos anteriores, no lograba dar cuenta de ese desprendimiento aislado de electrones; sólo una granizada de corpúsculos podía conseguirlo, no importando para nada el número de granizos (intensidad), pero si su condición de tal (frecuencia).

Mucho se hizo para evitar abandonar el concepto ondulatorio. De nada sirvió empeñarse en buscar, como lo hizo PLANCK, una explicación interatómica según la cual la materia, por absorción continua fuera acumulando la energía que le cede esa luz de debilísima intensidad hasta lograr la cantidad necesaria para liberar en forma discontinua a los electrones de sus átomos. Se hicieron experiencias con luz tan débil que se hubiera necesitado largo tiempo para la acumulación de energía, y sin embargo el fenómeno se producía instantáneamente.

J. J. THOMSON —aquél que, a la par de LORENTZ, tanto hizo por la elaboración y el perfeccionamiento de la teoría electrónica—, se empeñó afanosamente en encontrar la solución que no impusiera poner siquiera en duda la teoría ondulatoria, electromagnética y electrónica a la vez, cuyo «plan de acuerdo: FRESNEL-MAXWELL-LORENTZ», respondía tan satisfactoriamente a todas las exigencias de los hechos experimentales y de los tantos descubrimientos ópticos del siglo XIX. En su deseo de no abandonar esa magnífica herramienta de trabajo de la teoría ondulatoria de la luz, y fiel a los tantos elementos de convicción que, como lo vimos anteriormente, impusieron su victoria, J. J. THOMSON presentó una hipótesis conciliatoria: imaginó un éter fibroso en el cual la energía electromagnética seguiría el curso de las líneas de fuerza de FARADAY. La

parte ingeniosa de esa hipótesis consistía en mantener la teoría de las ondulaciones dentro de una mecánica del éter, y satisfacía las exigencias del momento manteniendo conjuntos de energía luminosa, no «distribuídos» como en los frentes de ondas, sino «reunidos» como si fueran corpúsculos, y así como lo exige la demostración del desprendimiento de electrones aun en el caso de iluminación sumamente débil. Sin embargo, pese a lo ingenioso de la hipótesis, el mundo científico no se sintió dispuesto a afrontar las ingentes dificultades del total reajuste de los fenómenos ópticos que imponía esta nueva imagen de un éter fibroso con un espacio lleno de tensores o rieles de cargas electricas.

¿No se reproducía acaso el mismo drama que vivieron los defensores de la teoría newtoniana cuando querían a toda costa salvar el concepto de las emisiones, frente a nuevos hechos, aparentemente inexplicables?

Nuevamente había llegado el momento de un golpe de audacia. Y aquí, entraron en escena, o mejor dicho en la lid: EINSTEIN y el «fotón»...

2

EL FOTÓN

El papel de corpúsculos de luz, cuya admisión fuera impuesta por el efecto fotoeléctrico, habían de desempeñarlo los «fotones» que EINSTEIN imaginó desde 1905, aunque el nombre de «fotones» les fué dado sólo más tarde por G. N. LEWIS. — Para mayor claridad y utilizando ahora la expresión de fotón, podemos repetir lo antes expuesto, en la forma siguiente: Un rayo de luz contiene fotones; todos los fotones tienen la misma velocidad, que es la velocidad de la luz, pero varían entre sí por la frecuencia correspondiente a los distintos colores; cuanto menor sea la intensidad de la luz, menos numerosos serán esos fotones; pero la cantidad de energía transportada por

cada uno de ellos será la misma para una misma luz, pues esta cantidad sólo depende de la frecunecia.

He aquí pues la restauración del concepto corpuscular con la teoría de los fotones; es, si se quiere, la partícula luminosa de la teoría de las emisiones de NEWTON que reaparece como fotón de EINSTEIN. Pero reaparece en un ambiente de conceptos científicos absolutamente distintos, sobre todo en cuanto a la energía a la cual escapaba el corpúsculo sin peso que NEWTON imaginara. Gracias pues a los nuevos conceptos y gracias a fenómenos nuevos, como los fotoeléctricos, aprenderemos a conocer mejor el corpúsculo luminoso.

El concepto de EINSTEIN, en fin, arrancaba directamente de la hipótesis de J. J. THOMSON, y, como ella, imaginaba el mantenimiento de la energía luminosa en cantidades discretas a través del espacio; pero, además, el concepto se ampliaba dando a la luz su aspecto de «*granos de energía*» tanto en la emisión por el cuerpo luminoso como en la absorción del cuerpo iluminado.

El mejor conocimiento del corpúsculo de luz reintegrado a la ciencia nos reserva en verdad sorpresas sensacionales y provoca repentinamente la entrada de nuevos personajes y la iniciación de nuevas acciones en el escenario y en la trama de este drama épico de la lucha de las teorías de la luz. Veamos...

En el intercambio de ondas electromagnéticas en energía cinética de electrones (como en el efecto foto-eléctrico) o en el intercambio inverso de energía cinética de electrones en ondas electromagnéticas (como en los rayos X), podemos establecer experimentalmente la relación entre la frecuencia de la onda electromagnética y la energía del electrón, y, al hacerlo, encontramos que esa relación es igual a: 6.55×10^{-27}, o sea el valor de una entidad de reciente introducción en la ciencia física, con la designación de h, o «constante de PLANCK».

Este feliz hallazgo experimental nos ocurre a nosotros, actualmente, tras varias décadas de experimentación; pero, en 1905, cuando EINSTEIN adoptó su actitud de audaz re-

volucionario, se fió en su sola intuición de puro teórico, y no en la experiencia, al introducir «a priori» la constante de PLANCK.

EINSTEIN propuso así la «ley del efecto fotoeléctrico», o «ley de EINSTEIN» expresada por la ecuación:

$$h\upsilon = \frac{1}{2} m v^2 + \varepsilon$$

en la cual h es la constante de PLANCK, υ la frecuencia de la radiación, $\frac{1}{2} m v^2$ la energía cinética del electrón que se desprende del cuerpo, y ε una constante característica del metal dado, constante igual al trabajo necesario para lograr el desprendimiento del electrón de ese metal.

La energía cedida al electrón, justo antes de su desprendimiento del metal (es decir —adelantándonos algo en el uso de un término nuevo— el «cuantum» de luz que provocará el desprendimiento del electrón) es expresada por $h\upsilon$; y, logrado el desprendimiento con un trabajo ε el electrón conserva, en el efecto fotoeléctrico, $h\upsilon - \varepsilon$

La simple observación de ese símbolo $h\upsilon$ expresa claramente el concepto de energía dado al fotón, tan distinto de la bolilla sin peso, y de sustancia distinta para cada color, de la teoría newtoniana. Aquí, al contrario, vemos, que a cada color corresponde una energía definida determinada por su frecuencia. Es así que la luz roja del espectro de frecuencia dos veces menor que la violeta, tiene un cuantum de una mitad, energía insuficiente para provocar el arranque de un electrón de su átomo, como ocurre en el efecto fotoeléctrico provocado por la energía del cuantum de luz violeta, de radiaciones ultravioletas o con los rayos X... Pero si pensamos en un corpúsculo y no en una vibración ¿qué sentido debemos dar a υ, expresión de su «frecuencia»? ¿Se trata aquí sólo de un factor numérico, sin realidad física alguna? Y las interferencias ¿cómo explicarlas físicamente con corpúsculos?

Dejemos a un lado esos obstáculos ya que para otros fenómenos la ecuación sirve; congratulémonos de su éxito en esos casos, éxito realmente maravilloso pues, como lo

expresa MILLIKAN, «*La prueba abrumadora de que la ecuación de* EINSTEIN *es una ecuación exacta, de validez general, constituyó quizá el progreso más conspicuo de la física experimental durante el decenio subsiguiente.*»

No obstante esa exactitud, tanto de las ecuaciones de EINSTEIN como de las de PLANCK en que se fundaban, los nuevos conceptos, tan revolucionarios, cuya admisión esas ecuaciones imponían, no lograron triunfar en el mundo científico sino mucho más tarde, en la tercera década de nuestro siglo XX, cuando nuevos descubrimientos exigieron su oportuna e imprescindible ayuda.

Observemos asimismo que la ecuación de EINSTEIN permite crear un nuevo método de determinación de la frecuencia (v) de una radiación, ya que la energía del electrón ($\frac{1}{2}$ m v^2) puede ser medida experimentalmente por su trayectoria. MAURICIO DE BROGLIE, el hermano de LUIS DE BROGLIE, de quien hablaremos tan particularmente más adelante, fué el creador de ese método.

3

TEORÍA DE LOS CUANTA

Pero ¿dónde fué a buscar EINSTEIN esa constante de PLANK que acababa de introducir con tan preponderante papel en esta renovada explicación corpuscular de la luz? No podemos exponer, ni aun sintetizar aquí, como simple aclaración al margen de este resumen histórico de la evolución de la síntesis de la luz, en qué consiste la idea renovadora introducida por PLANCK (n. 1858) en la física, ni cuáles fueron los amplios desarrollos y las numerosas consecuencias de su «teoría de los cuanta». Es esto tan imposible como pretender bosquejar en igual forma la teoría o las teorías de la relatividad de EINSTEIN, que también tienen intervención directa sobre el desarrollo de la Óptica Nueva.

Pero es curioso observar que, aun el más profano en cuestiones científicas tiene cierta noción de la trascenden-

cia, de la complejidad y de la temeridad científica del relativismo einsteniano, que fué motivo de comentarios en todos los ambientes, y más desenfrenadamente en los medios menos capacitados para poder opinar al respecto. La «teoría de los cuanta» de PLANCK, de consecuencias tan revolucionarias como los conceptos einsteinianos, no impresionó mayormente al gran público, ni llegó tal vez a su conocimiento, debiendo encontrarse quizás la causa de semejante indiferencia en la forma menos visible en que PLANCK atacó conceptos, antropomorfismos o prejuicios hondamente arraigados en nuestro espíritu y admitidos, sin mayor examen a veces, por nuestro «buen sentido». Sin embargo, como lo expresa acertadamente CAMPBELL, la teoría de la relatividad sólo ejerció su influencia sobre una parte reducida de los resultados prácticos de la física mientras que la teoría de los cuanta, menos espectacular y teatral en su presentación, determinó directamente muchos resultados científicos concretos en distintos capítulos de la física.

Dos palabras pues sobre la teoría de los cuanta con el solo fin de familiarizarnos con algunas expresiones y fijar dos o tres fechas.

No podemos, por cierto, tener otras pretensiones si recordamos esas palabras de LUIS DE BROGLIE cuya genial intervención en la evolución de las teorías de la luz señalaremos más adelante: «*El público tiene pocas nociones, por vagas que sean, acerca de la teoría de los cuanta. Debe confesarse que es disculpable, porque los cuanta son una cosa muy misteriosa. Por mi parte, tenía unos veinte años cuando primero me ocupé de ellos; hace un cuarto de siglo que medito a su respecto y debo confesar humildemente que si logré en el curso de esas meditaciones comprender un poco mejor algunos de sus aspectos, no sé aún exactamente lo que se oculta detrás del antifaz con que se cubren el rostro...*»

Limitémonos pues aquí a algunos comentarios y algunas fechas.

Hemos visto ya, cómo, a fines de siglo XIX, seguía realizándose el sueño de FARADAY, la unificación de todos los fenómenos naturales. A la unión de la electricidad con

el magnetismo, realizada por AMPÈRE en 1820, y a la unión del electromagnetismo con la óptica, realizada por MAXWELL en 1873, se incorporaba la mecánica, pues la materia —concebida como estructura granular eléctrica por la teoría de los electrones que edificaron LORENTZ y J. J. THOMSON—se unía a las radiaciones de modo que todos los fenómenos físicos con sus teorías particulares (teorías electrodinámicas, electromagnéticas, ondulatoria vectorial y mecánica clásica), podían considerarse armoniosamente enlazados en una sola síntesis.

Pero ante esa calma aparente, surgió nuevamente el incidente de discordia...

KIRCHHOFF (1824 - 1887), STEFAN (1835 - 1893), BOLTZMANN (1844 - 1908), WIEN (1864 - 1928) y MAX PLANCK (n. 1858), eran los nombres más familiares para todos los que, a fines del siglo pasado, se interesaban en el estudio de la energía radiante desde el punto de vista termodinámico. Y, en ese sector de las investigaciones físicas, tan abundante y cautivante como el que estudiamos en este momento, surgía también un problema rebelde a las teorías admitidas: el problema de la repartición de la energía en el espectro del «cuerpo negro». Este «cuerpo negro», o sea «el cuerpo que absorbe íntegramente todas las radiaciones», había sido concebido por KIRCHHOFF. Es un radiador integral de modo que, en incandescencia, emite luz de todas las longitudes de onda. Este cuerpo negro teórico tiene su representación práctica en un horno cerrado en el cual por reflexiones sucesivas en las paredes se establece un perfecto equilibro térmico, es decir en que haya compensación absoluta entre la emisión y la absorción de radiaciones. Las leyes de radiación del cuerpo negro, comprobadas así por la experiencia, habían sido descubiertas por STEFAN (1879), quien estableció la relación entre la radiación del cuerpo negro y la cuarta potencia de su temperatura absoluta, y por WIEN (1894) quien estableció que la longitud de onda correspondiente al máximum de emisión del cuerpo negro es inversamente proporcional a su temperatura absoluta.

Estas leyes se resumían en una fórmula general:

$$p_\nu = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

siendo p_ν la «densidad de la energía radiante», es decir la cantidad de energía radiante correspondiente a cada unidad de volumen, υ su frecuencia y T la temperatura absoluta.

Ahora bien, cuando se busca el valor matemático de esa función $f\left(\frac{\nu}{T}\right)$ aplicándose al estudio de la repartición de la energía la teoría electromagnética, cualquiera sea la solución que se busque, se llega a conclusiones coincidentes con una fórmula establecida por los físicos ingleses RAYLEIGH (1842 - 1919) y JEANS:

$$p_\nu = \frac{8\,\pi\,K}{c^3}\,T\,\nu^3$$

en la cual c es la velocidad de la luz y K la "constante de BOLTZMANN.» Pero esta fórmula de RAYLEIGH-JEANS no coincide con la experiencia sino en el caso de valores muy pequeños de $\frac{\nu}{T}$, pues daría un enorme valor a la energía para pequeñas longitudes de onda o sea para una gran frecuencia, mientras que las experiencias de LUMMER y PRINGSHEIM, en 1899, demuestran que el máximum de energía es alcanzado para longitudes de onda medianas.

Esta discordancia queda evidenciada gráficamente si se traza la curva de la repartición de la energía para las distintas longitudes de onda. Esta curva de LUMMER y PRINGSHEIM, con forma de campana, variable según el grado de temperatura, debe ser regida por igual por las observaciones experimentales y por la ley general de radiación. No ocurría así, y la mecánica clásica no ofrecía solución alguna.

Este fué el incidente perturbador. En 1900, PLANCK presentó el «plan de pacificación», pero exigió con éste concesiones tan importantes como el reconocimiento de la dis-

continuidad de la energía o sea el abandono del viejo axioma expresado por LEIBNIZ: «Natura non facit saltus». PLANCK exigía pues la admisión de que la naturaleza desconoce la continuidad y siempre obra por saltos: granos de materia, granos de energía.

CHWOLSON dice al respecto de esta intervención de PLANCK: «*Una idea de una audacia inverosímil surgió en la mente de* PLANCK *y en aquel momento él se apoderó con mano poderosa del timón de aquel barco que se llama la física; y el navío zarpó hacia un nuevo rumbo a través de una región extraña y hasta entonces ignota, ya alumbrada con viva luz, ya recubierta por espesa bruma. Y hasta este momento es imposible saber hacía dónde se dirige y cuándo se disipará la bruma...* (1)»

4

CONTINUIDAD Y DISCONTINUIDAD

Si no fuera tan limitado el espacio del que aquí disponemos, sería ésta sin duda una excelente oportunidad para detenernos unos instantes, a manera de digresión, en otro capítulo interesante de la historia de la física: el pleito entre el concepto de *continuidad* y el concepto de *discontinuidad*, pleito secular también, tan antiguo como el pleito de la luz, tan antiguo pues como la ciencia misma. Veríamos que el concepto de la infinita divisibilidad de la materia ejerció siempre, por su claridad y su innegable lógica, un gran atractivo sobre el espíritu, pero que, desde la antigüedad más remota y particularmente desde LEUCIPO y DEMÓCRITO, en el siglo V antes de nuestra era, fué fortaleciéndose cada vez más, impuesto por ineludibles exigencias científicas, el concepto de la discontinuidad de la materia con la imagen del átomo

(1) CHWOLSON. *La Physique de 1914 à 1926*. Tomo I, página 26.

inalterable e indivisible. Veríamos que este átomo, que fué un simple punto material desprovisto de extensión, como en la mónada de LEIBNIZ, adquirió forma y extensión, volviéndose una verdadera bolita maciza en la teoría cinética de los gases, y luego se transformó en un mundo complejo, en un sistema planetario con su sol y sus planetas, su núcleo (simple o complejo) y sus electrones u otros corpúsculos nuevos que hacen retroceder, un poco más allá, el límite de divisibilidad. Pero veríamos además que, para animar este mundo de elementos microscópicos y para establecer relaciones entre ellos, debemos imaginárnoslos como centros de campos de fuerza, o considerarlos constituídos por electricidad, o debemos recurrir al hipotético intermedio del éter electromagnético, siendo cualquiera de esas u otras soluciones concesiones hechas por el concepto de la discontinuidad al concepto de la continuidad.

De cualquier modo, al llegar a fines del siglo XIX, si bien la teoría atomística había hecho grandes progresos en cuanto a la elaboración de sus imágenes e hipótesis, no se ofrecían todavía pruebas experimentales de la existencia real del átomo.

MACH pudo decir entonces que la hipótesis atómica carecía aún de certeza y podía ser considerada superflua. Muy pronto habían de surgir esas pruebas reales y es éste uno de los primeros galardones del siglo XX.

La energía era el último refugio del concepto de continuidad, de una continuidad absoluta, contrariamente a la discontinuidad que, como acabamos de verlo, no podía desprenderse de la continuidad; y, como energía, la luz, representada por una ondulación que se propaga en el medio continuo del éter, era clara imagen de esa continuidad perfecta.

Fueron la teoría de los cuanta de PLANCK, con su consecuencia: el fotón de EINSTEIN, y la mecánica ondulatoria las que desalojaron el concepto de continuidad de éste su último refugio.

Decíamos pues que PLANCK, en la misma aurora de nuestro siglo XX, propuso una solución para el incidente perturbador surgido en el estudio de los cambios de energía entre materia y radiación, y esta simple proposición adquirió insospechados alcances. Presentó la fórmula siguiente que coincide en absoluto con la experiencia:

$$\rho_\nu = \frac{8\,\pi\,h\,\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\,\nu}{K\,T}} - 1}$$

La interpretación de esta fórmula impone admitir que los cambios de energía entre los átomos y el medio sólo pueden producirse por cantidades discretas o sea por cantidades que varían por unidades, por saltos, por escalones, porque deben ser siempre múltiplos de la cantidad elemental de energía (ε) que los átomos son capaces de emitir o absorber, cantidad que depende a su vez de la frecuencia (ν) de los vibradores atómicos.

Esa cantidad de energía es:

$$\varepsilon = h.\,\nu$$

siendo *h* la «constante de PLANCK», cuyo valor perfectamente determinado es de 6.56×10^{-27} ergios $\times$ segundo, o sea un valor tan pequeño que sólo pueden concebirlo mentalidades muy adiestradas en la apreciación de magnitudes matemáticas.

Y esa constante (h) o «coeficiente de PLANCK» es lo que se llama en mecánica una «acción» por ser el producto de una energía por un tiempo (1), es el «quantum de acción», mientras que ε es el «quantum de energía».

De ahí la expresión de teoría de los «cuanta», siendo la palabra «quanta» el plural de la palabra latina «quantum».

(1) $h = \frac{\varepsilon}{\nu} = \varepsilon \frac{1}{\nu}$ La inversa de la frecuencia $\left(\frac{1}{\nu}\right)$ es el tiempo. Acción en mecánica es la suma (integral) de los valores sucesivos del producto: fuerza viva $\times\ \Delta t$ o sea: energía por tiempo.

Pero observemos bien que existe una diferencia fundamental entre el «quantum de acción» y el «quantum de energía» desde el punto de vista de la continuidad y de la discontinuidad, pues el «quantum de energía» $\varepsilon = h. \nu$ es una variable continua ya que, aunque *h* sea constante, ν (la frecuencia) varía en forma continua.

Para darnos cuenta mejor de la pequeñez de *h* conviene verlo expresado así:

$$h = 0{,}000000.000000.000000.000000.00655 \text{ seg.} \times \text{ergs.}$$

Puede compararse, como lo hace JEANS, con la «acción» de una sola oscilación del péndulo de un reloj de pared que es aproximadamente igual a:

$$400.000 \text{ seg.} \times \text{ergs.}$$

También ayuda nuestra imaginación, la apreciación de RUSK de que la acción de seg. $\times$ erg. es la que corresponde a levantar un párpado a velocidad moderada.

Así que los cuanta de energía, es decir, los átomos de energía, no tienen como los átomos de materia o de electricidad una magnitud invariable sino que su magnitud depende de la frecuencia.

El concepto revolucionario de PLANCK fué, en general, mal recibido por los físicos. Aunque reconocieran la exactitud de la fórmula en sí, no estaban dispuestos por ello a renunciar a su fe en las teorías clásicas, fe que, por otra parte, no había sido conmovida aun por la relatividad.

Ni siquiera el mismo PLANCK sospechaba haber sacudido hasta sus bases más hondas nuestros conceptos seculares acerca del mundo físico y no se figuraba por cierto, haber iniciado una era nueva en la ciencia física, señalada por el más brusco recodo de su ruta de evolución desde los tiempos lejanos en que las primeras etapas fueran trazadas por ARISTÓTELES y ARQUÍMEDES. Podía afirmarse de PLANCK, como se dijo de HERTZ, que, en aquella época, PLANCK era el menos «planckista» de los sabios. Sólo veía en el quantum una habilidosa ocurrencia mate-

mática para eludir momentáneamente el «incidente del cuerpo negro».

Ante ciertos gritos de alarma de sabios tan sagaces como POINCARÉ, que divisaron la tremenda amenaza contra la ciencia consagrada, contenida tanto en los conceptos relativistas como en los cuánticos, PLANCK vislumbró los posibles alcances de su ocurrencia, y entonces sintió temor y quiso limitar estrictamente el concepto cuántico a la emisión, no admitiendo su extensión, ni a la absorción de energía radiante, ni a su propagación en el espacio.

Pero la teoría de PLANCK empezó a extenderse cuando EINSTEIN (cuya admiración por la obra de su compatriota es absoluta) se basó en ella, en 1905, para establecer la teoría del «quantum de luz», (como nos anticipamos ya a llamarlo), «quantum de luz» que más tarde fué denominado «fotón».

Mientras PLANCK mantenía la condición de discontinuidad en el cuerpo radiante, verdadero resonador emisor de radiaciones, y no en la radiación misma, EINSTEIN la extendía sin vacilación a la radiación, o sea a la luz, a la cual atribuyó una constitución corpuscular semejante a proyectiles de energía reunida.

Continuó extendiéndose la teoría de PLANCK cuando el mismo EINSTEIN, en 1907, la aplicó al calor específico a fin de solucionar otro incidente perturbador planteado por NERNST, quien había demostrado que el calor específico de los cuerpos simples sólidos tiende hacia cero cuando la temperatura se acerca al cero absoluto, contrariamente a la independencia entre el calor específico y la temperatura, establecida por la física clásica.

5

BOHR — SOMMERFELD

BOHR (n. 1885). — Después de la extensión de la teoría de PLANCK hecha por EINSTEIN, en 1905, como explicación del efecto fotoeléctrico, en el año 1913 la teo-

ría cuántica se generalizó a toda la física, debido a los conceptos de un joven físico danés, de 27 años de edad, NIELS BOHR, quien extendió la teoría de PLANCK a la estructura del átomo y a los fenómenos espectroscópicos.

Es perfectamente lógico que, en esta evolución de los conceptos acerca de la naturaleza de la luz, aparezcan los conceptos acerca de la constitución misma de la materia, ya que en la materia nace y muere la radiación. Y es lógico que esta constitución esté explicada de manera que satisfaga todas las exigencias impuestas por el estudio tan desarrollado de la espectroscopia como conjunto de características innegables de la misma constitución íntima de la materia.

El átomo de BOHR está basado en el mismo modelo atómico de RUTHERFORD: un núcleo positivo, astro central alrededor del cual giran los pequeñísimos electrones negativos cuyo número varía según el elemento de que se trate.

Con su movimiento giratorio alrededor del núcleo, el electrón produce los mismos efectos que una corriente eléctrica y emite, por consiguiente, ondas electromagnéticas de frecuencia igual al número de revoluciones por segundo.

Como el átomo es eléctricamente neutro y cada electrón tiene una carga negativa fija, de 1.6×10^{-9} culombios, que es la «carga eléctrica elemental», cada núcleo tendrá una carga positiva igual a tantas cargas elementales como tenga electrones el átomo: desde 1 para el hidrógeno, elemento de peso atómico menor, hasta 92 para el uranio, elemento de mayor peso atómico (238.2), pasando por todos los valores intermediarios: 2, el helio; 3, el litio; 4, el berilio; 5, el boro; 6, el carbono; 7, el nitrógeno; 8, el oxígeno, etc.

Por otra parte, de acuerdo con las leyes de la electrodinámica clásica, el electrón, en la concepción planetaria del átomo, debería perder constantemente energía al recorrer su órbita con aceleraciones (cambios de velocidad o de dirección) que significan radiación. Después de un tiempo, que puede ser calculado en una fracción de segundo, el

electrón debería acercarse entonces al núcleo, hasta neutralizarlo en el momento de reunirse con él; el sistema carecería pues de toda estabilidad. Además, al acercarse el electrón al núcleo, aumentaría la frecuencia de la radiación en forma continua (por ser igual la frecuencia al número de revoluciones del electrón por segundo), y debería ser continuo el espectro de dichas radiaciones. Nada de eso ocurre en la experiencia, pues el átomo constituye un sistema perfectamente estable; no hay tal pérdida de energía; en condiciones normales el átomo no emite radiación y cuando lo hace (estando ionizado, por ejemplo) emite un espectro discontinuo cuyas rayas están determinadas con toda precisión (ecuación del BALMER-RITZ).

J. J. THOMSON evitaba, sin duda, esos graves inconvenientes del modelo planetario del átomo propuesto por RUTHERFORD, presentando un átomo constituido por una esfera de electricidad positiva en que estaban sumergidos los electrones. Pero los descubrimientos del mismo RUTHERFORD acerca del bombardeo de átomos con partículas α, echaron por tierra la posibilidad del modelo de THOMSON.

Por ello, BOHR se empeñó en buscar la solución, sin abandonar la imagen planetaria; pero introdujo en ella el concepto de los cuanta. Dedicó su estudio al átomo de estructura más sencilla por tener un solo electrón: el átomo de hidrógeno.

Basándose en la electrodinámica y la mecánica clásicas se pueden fijar como trayectoria del electrón único del hidrógeno una infinidad de órbitas iguales a las órbitas planetarias, haciendo variar las condiciones del problema. Para mayor comodidad, se pueden elegir órbitas circulares de tipo «copernicano», en lugar de elipses «keplerianas», y aplicarles las leyes de COULOMB.

BOHR estableció entonces «a priori» ciertas condiciones cuyo valor radica, más aun que en su originalidad conceptual, en su oportunidad explicativa y en la exactitud perfectamente comprobable de sus consecuencias.

La primera condición es que el movimiento del electrón en el átomo sólo puede hacerse en las «órbitas estables», órbitas en las cuales el momento de la cantidad de movimiento del electrón con relación al núcleo sea un múltiplo de $\frac{h}{2\pi}$

Cualquiera otra órbita que no satisfaga esta condición, le queda vedada al electrón.

Con esta condición se introduce el discontinuo de PLANCK y se selecciona entre la infinidad de órbitas posibles, un número limitado de ellas, que son las «órbitas estables» de los electrones. Para el hidrógeno, esas órbitas del electrón único quedan establecidas así: la órbita más pequeña tiene un radio de 0.55 A (Angstrõm o sea 1 cienmillonésimo de cm.) y las órbitas siguientes tienen un radio, 4, 9, 16... veces mayor. La selección de órbitas hecha por BOHR satisfacía además las exigencias de la espectroscopia y de sus ecuaciones.

Esta primera condición, o «condición de cuantificación», impuesta «a priori» por BOHR, significa la extensión del concepto cuántico a la mecánica, mientras que, anteriormente, había sido limitada su intervención a las radiaciones.

La segunda condición de BOHR, que se planteó en atrevida contradicción con la teoría clásica de la electricidad, establece que, contrariamente a las leyes de la electrodinámica clásica, conservadas por la teoría electromagnética, el electrón no emite energía radiante mientras gire en una de esas «órbitas estables», o sea: mientras se encuentre en «estado estacionario» o «estado cuántico», lo que permite hacer durar indefinidamente dicho movimiento, y asegurar la estabilidad del átomo.

La tercera condición impuesta por BOHR es que sólo habrá emisión de energía, o sea radiación, cada vez que un electrón, bajo la influencia de alguna perturbación, de explicación bastante misteriosa, salte de una órbita a otra, acercándose al núcleo; y la diferencia de energía será

un múltiplo de h y será proporcional a la frecuencia v de la radiación emitida.

Cuando el electrón, debido a una perturbación pasa a una órbita más lejana al núcleo, habrá absorción de energía.

Esta condición queda expresada de la manera siguiente:

$$E_1 - E_2 = h\,v$$

o sea que:

$$v = \frac{E_1 - E_2}{h}$$

La frecuencia de la radiación producida por el paso del electrón de una a otra órbita es igual a la relación entre la diferencia de la energía y la constante de PLANCK.

Esta tercera condición, que logró explicar satisfactoriamente las características espectroscópicas del hidrógeno, aun las más irregulares como la serie de BALMER, no es sino la aplicación del concepto cuántico a fenómenos de radiación, como ya lo habían hecho PLANCK y EINSTEIN.

Así que BOHR estaba en contradicción con la electromagnética y con su aplicación al átomo planetario durante lo que llamó el estado estacionario o cuántico, período en que las revoluciones del electrón, pese a su aceleración por cambio de dirección, no pueden, según BOHR, perder energía ni producir radiación. Pero, en el momento del salto de una órbita a otra, esta radiación se produce y por consiguiente, en ese período, la teoría de BOHR reproduce la pérdida de energía establecida por la electrodinámica; la diferencia radica pues en que, en el átomo clásico y de acuerdo con la teoría electromagnética, esa radiación era continua, mientras que para BOHR es discontinua, efectuándose por saltos. Cuanto más frecuentes sean estos saltos, más se parecerán los dos conceptos: en esto se basa lo que llamamos el «principio de correspondencia de BOHR».

Este principio de BOHR no es sino el cumplimiento del anhelo de reconciliar las hipótesis que nos imponen las explicaciones de los fenómenos de la física microscópica con las teorías y principios que nos ha impuesto la física ma-

croscópica. Las teorías de la luz que señalaremos más adelante también cumplen con ese mismo anhelo.

Aunque BOHR no coincide con EINSTEIN en cuanto a la ubicación de la discontinuidad, estableció como él, la relación entre energía electrónica y energía radiante, pero en sentido inverso, pues demostró, con la ecuación que acabamos de ver, que la energía perdida por un electrón al saltar de una órbita a otra se transforma íntegramente en radiación.

Así como lo expresa claramente MILLIKAN, «EINSTEIN y BOHR *establecieron una relación recíproca y reversible entre la energía electrónica y la energía radiante*».

Durante los años siguientes, con numerosas pruebas experimentales de efectos fotoeléctricos correspondientes ya a emisiones electrónicas provocadas por ondas, ya a ondas provocadas por bombardeos electrónicos, la relación EINSTEIN-BOHR fué comprobada en ambos sentidos.

Tanto el concepto del «quantum de luz» de EINSTEIN como los conceptos cuánticos de BOHR estaban lejos de la perfección en cuanto a su explicación completa de ciertos fenómenos.

Es así como el «quantum de luz» de EINSTEIN, llamado más tarde «fotón», explicaba el efecto fotoeléctrico y los fenómenos ópticos «neutrales» comprendidos ya en la teoría corpuscular de NEWTON, pero mientras tanto los otros fenómenos ópticos exigían el mantenimiento de la teoría de FRESNEL. (Véase el cuadro general). La teoría de BOHR, coronada por grandes éxitos en las primeras comprobaciones, no logró explicar irregularidades descubiertas posteriormente y sólo lograba, por otra parte, explicar el mecanismo sencillo del átomo de hidrógeno o del helio ionizado, átomos de un solo electrón, no pudiendo dar solución siquiera al problema del helio no ionizado, es decir, con dos electrones. Y existen, como lo sabemos, átomos de 1 a 92 electrones, o más aun, según hipótesis recientes...

Se estaba lejos pues de la perfección, pero se debía seguir con empeño la marcha en el mismo arriesgado camino si no se quería confesar el fracaso de esas nuevas jornadas

de la ciencia y renunciar a sus indiscutibles y sorprendentes triunfos... Nuevas soluciones habían de surgir.

Ya dijimos que, por razones de comodidad, BOHR atribuyó a las órbitas la forma circular, es decir la forma «copernica» y no la forma «kepleriana», o sea elíptica.

SOMMERFELD. — En 1916, Arnoldo SOMMERFELD, de Munich, obtuvo un nuevo triunfo para la teoría de BOHR introduciendo en ella el agregado de que, en el átomo de hidrógeno, la primera órbita es circular, pero que al segundo estado cuántico corresponden dos órbitas, una circular y la otra elíptica; siendo el eje mayor de ésta igual al diámetro de la circunferencia de la órbita circular, y su eje menor igual a la mitad o sea al radio de la órbita circular.

Con esta innovación, y aplicando el concepto relativista de la variación de la masa con la velocidad, SOMMERFELD preveía que, por tener así energías ligeramente diferentes las dos órbitas, las líneas espectroscópicas del hidrógeno y del helio correspondientes al segundo estado, deben ser dobletes tan próximos que se confunden.

Aquí, volvió a producirse otro de los tantos milagros de la Física Nueva: la experiencia demostró la exactitud de esa previsión teórica, hipotética y apriorística; y además, la distancia entre las líneas correspondió con gran aproximación al valor previsto por el cálculo teórico.

En las órbitas sucesivas de los átomos de distintos cuerpos, se atribuye al tercer estado cuántico 3 órbitas: 1 circular y dos elípticas; al cuarto estado, 4 órbitas: 1 circular y tres elípticas; etc. Todas las órbitas elípticas de un mismo estado cuántico tienen un mismo eje mayor igual al diámetro de la órbita circular, mientras que los ejes menores están entre sí en la relación 1, 2 y 3...

Por las leyes de NEWTON, la igualdad del eje mayor de todas las órbitas elípticas con la circunferencia de la órbita circular impondría una misma energía en todas las órbitas de un mismo estado cuántico; pero la teoría de la relatividad de EINSTEIN produce, con el cambio de la masa

por la velocidad, pequeñas variaciones que son comprobadas por las observaciones de líneas finas, espectroscópicas.

Así como EINSTEIN lo hiciera con el fotón en 1905, esta intervención de SOMMERFELD significó un nuevo lazo entre la relatividad y los cuanta.

MILLIKAN expresa al respecto que: «*Ninguna fórmula teórica en la historia de la física logró triunfos más sensacionales que la fórmula de la relatividad de* SOMMERFELD, *en su aplicación a la estructura fina espectroscópica.*»

El «átomo de BOHR» se volvió así «átomo de BOHR-SOMMERFELD». En el mismo año (1916), EPSTEIN, del Instituto de California, introdujo aún nuevas interpretaciones sobre las cuales no insistiremos aquí señalando solamente que estas innovaciones también encontraron amplia comprobación experimental en espectroscopia (efecto de Stark).

En 1917, EINSTEIN precisó más aun su concepto corpuscular del fotón, ya universalmente admitido, agregando, de acuerdo con la teoría relativista, que el grano de luz debe transportar en su trayectoria, además de su energía $h\nu$, el «impulso» o «momento», o sea una cantidad $\frac{h\nu}{c}$ (siendo c la velocidad de la luz en el vacío), como lo establece la teoría relativista para los proyectiles. Agregó que el átomo emisor debe sufrir un retroceso en el momento de la emisión. De esas precisiones, EINSTEIN dedujo consecuencias concordantes con la fórmula de PLANCK de la radiación a la cual nos hemos referido, y con la ley de distribución de las velocidades moleculares establecida por MAXWELL en su teoría analítica de la cinética de los gases, en 1859.

La teoría de los fotones, imprescindible para la explicación del efecto fotoeléctrico, quedó pues planteada en oposición con el concepto ondulatorio, imprescindible a su vez para la explicación de las interferencias y de la polarización. La explicación de la naturaleza de la luz, lejos de estar resuelta, era víctima de un angustioso «complejo de dualidad».

6

EFECTO COMPTON

En 1923, ocurrió un acontecimiento de gran importancia: el descubrimiento del «efecto» que lleva el nombre del profesor A. H. COMPTON (n. 1892) de la Universidad de Chicago, profesor, a la sazón en Wáshington (Saint-Louis), COMPTON observó que rayos X que sufren difusión al atravesar materia de átomos ligeros como el grafito o la parafina, adquieren un aumento de longitud de onda, contrario a las deducciones de la electromagnética clasica.

La explicación cuantitativa del efecto COMPTON se encontró de inmediato en los conceptos cuánticos aplicados por EINSTEIN al fotón, atribuyéndose su causa a un choque elástico entre el fotón de rayos X con el electrón casi libre del átomo de materia difusora, y aplicándose al caso las leyes del choque de la mecánica clásica o sea: conservación de la fuerza viva y de la cantidad de movimiento (leyes de HUYGHENS y de DESCARTES). Se trataba de un choque de bola de billar en movimiento (fotón) con otra bola de billar en reposo (electrón).

Durante el choque, el fotón cede parte de su energía al electrón y por consiguiente, podemos expresar que, al perder energía:

$$h\,\upsilon > h\,\upsilon'$$

o sea: $$\upsilon > \upsilon'$$

Disminuye pues la frecuencia, o sea: aumenta la longitud de onda, tal como lo observara COMPTON.

Por otra parte, el electrón inmóvil que recibió la energía perdida por el fotón, adquiere una velocidad de retroceso comprobable experimentalmente.

Así que de esta explicación tan favorable al concepto corpuscular y a la explicación de la luz por el fotón, llegamos a la conclusión de que, cuando un fotón encuentra

un electrón en un átomo, su energía cinética puede ser completamente absorbida para producir el efecto fotoeléctrico, o puede el fotón no ceder sino parte de su energía al electrón como acabamos de verlo en el efecto COMPTON.

COMPTON conquistó el Premio Nóbel con su maravilloso descubrimiento que se consideró «*el testimonio personal más serio a favor de la hipótesis de los cuanta de luz localizados*».

Era éste sin duda un nuevo triunfo del concepto cuántico que, como lo expresa bien ABEL REY [1] «*tiene una posición inversa de la mayor parte de las teorías físicas. Éstas, en general, parten de principios claros y precisos y revelan una estructura lógica impresionante, aunque luego la historia muestre que las consecuencias sacadas de aquellos claros principios y de esa estructura lógica, tras la explicación de los fenómenos sencillos que la sugirieron, se encuadran cada vez menos exactamente dentro de la experiencia cuando ésta se precisa y se extiende a casos cada vez más complejos. En la teoría de los cuanta, al contrario, los resultados experimentales encuadran notablemente en la hipótesis; y cuanto más se extiende mayores son sus éxitos. Pero la hipótesis en sí es difícilmente comprensible. No subsiste por su orden lógico y por la claridad que presta al espíritu, sino por su éxito experimental. La teoría está aún lejos de encontrarse a punto; esto es seguro. Es preciso esperar que la física la explique para poder tentar de comprenderla desde el punto de vista filosófico*».

7

LOS DOS CAMINOS

¿Cuál era pues la situación en el año 1923? El efecto COMPTON acababa de traer una nueva prueba de la realidad mecánica del fotón, partícula de luz tal como la concebía la teoría de la emisión; pero la ciencia tenía la obli-

(1) Citado por PAPANASTASSIOU. Obra citada.

gación de mantener, conjuntamente con ese concepto corpuscular, discontinuo que con tanto éxito explica las relaciones entre la materia y la energía radiante, el concepto continuo, y por consiguiente antagónico, de la teoría ondulatoria de FRESNEL, impuesta indefectiblemente para la aplicación de los fenómenos ópticos y particularmente de las interferencias de la difracción y de la polarización.

Observemos también que hemos dicho que el corpúsculo de luz tiene una energía $h\upsilon$, siendo υ la frecuencia de una vibración, concepto ondulatorio por excelencia siempre que no se den a υ valores de coeficientes características de los distintos fotones.

Esta dualidad, este antagonismo, esta diversidad de criterio significaban una evidente falla que exigía nuevas soluciones. Se trataba de una verdadera crisis que no sólo se planteaba en la óptica sino en toda la mecánica, crisis producida por la falta de armonía resultante del injerto de conceptos novísimos en el viejo tronco de la mecánica clásica, por una parte, y en la dificultad de conexión entre el concepto corpuscular del fotón y el concepto ondulatorio de la teoría de FRESNEL, por otra parte.

Así como debía encontrarse una óptica nueva capaz de abarcar la óptica de FRESNEL y la óptica de NEWTON-EINSTEIN, sin olvidar los fenómenos electro-ópticos explicados por la teoría de MAXWELL, debía encontrarse una mecánica nueva capaz de abrazar la mecánica clásica de GALILEO, NEWTON y LAGRANGE conjuntamente con la mecánica relativista de EINSTEIN (mecánica de velocidades enormes del orden de la velocidad de la luz) y con la física atómica de conceptos cuánticos (mecánica de lo infinitamente pequeño o «micromecánica»).

A los dos aspectos, corpuscular y ondulatorio, BOHR los llama «complementarios» y establece a su respecto un «principio de complementaridad», principio natural y general, según el cual, cuando una cualidad atomística se evidencia, la otra que pueda existir, en oposición, se oculta automáticamente. Así cuando observamos fenómenos ópticos de origen corpuscular se eliminan por ley natural las propiedades ondulatorias del quantum de luz, ocurrien-

do exactamente lo mismo en el caso inverso. De acuerdo con este principio, un átomo no se deja jamás contemplar simultáneamente en sus dos aspectos; no logramos ver sino uno de sus dos perfiles. ¿Es posible resignarse a permanecer en esta situación? ¿Puede admitirse que la nueva física microscópica exige de nosotros la creación de un espíritu nuevo capaz de avenirse a esas oposiciones simultáneas y, sin embargo, alternadas en forma indeterminada?

La situación era sumamente embarazosa y jamás la historia de la luz, ni aun la historia de la física, se había encontrado ante semejante encrucijada. Aquí ya no se trataba de elegir entre dos teorías que se proponían explorar un mismo fenómeno o un mismo grupo de fenómenos con conceptos opuestos o con imágenes distintas. La teoría ondulatoria y la teoría cuántica no se disputaban un mismo terreno sino que cada una de ellas daba absoluta satisfacción en la explicación de todos los fenómenos que la otra no podía, de manera alguna, explicar. Esta «repartición del trabajo» podría hasta cierto punto haberse admitido si no se hubiera tratado de fenómenos de por sí inseparables y pertenecientes a un mismo terreno y si, además la explicación por una teoría no hubiera resultado absolutamente inadmisible e ilógica para la otra.

J. J. THOMSON describe esta dualidad en forma pintoresca cuando confiesa la inconciliabilidad de las dos teorías en las palabras siguientes: «*Las situaciones respectivas de las dos teorías son las de un tigre y un tiburón. Cada uno de esos animales representa lo más poderoso en su elemento, pero el valor de cualquiera de ellos se anula cuando se encuentra en el elemento del otro...*»

Poner de acuerdo un tigre y un tiburón es, sin duda, tarea difícil y arriesgada... Pretender que el tigre mate al tiburón y reine en su acuático dominio, o viceversa, es también empresa azarosa y desalentadora. He aquí, sin embargo, continuando la imagen de THOMSON, cuáles eran las únicas soluciones que se ofrecían como posibles.

Los físicos no se descorazonaron. Las soluciones no tardaron en presentarse y señalaron dos caminose distintos para salir del laberinto, dos caminos que, después de

algunas divergencias, tienden a fundirse en uno solo: Uno permite proseguir la marcha de la mecánica clásica empalmándola con los nuevos conceptos; y el otro es un camino nuevo cuyo punto de partida se encuentra en los conceptos atómicos cuánticos.

El primer camino —el que pretende proseguir la marcha de la física, aunque la dirija hacia conceptos extraordinariamente revolucionarios— fué seguido de primer intanto por LUIS DE BROGLIE en 1924 y por SCHRÖDINGER, en 1926; y los llevó a la «mecánica ondulatoria».

El segundo camino —el que se aparta desde su iniciación de los trazados tradicionales y especialmente de toda imagen sensorial del átomo— fué seguido por HEISENBERG en 1925 y por BORN, JORDAN y DIRAC, y condujo a la «mecánica cuántica».

Este último grupo de sabios renuncia pues en absoluto a toda relación entre la mecánica cuántica y la mecánica clásica, relación que BOHR había querido establecer por medio del «principio de correspondencia» a fin de evitar el conflicto planteado por esa divergencia.

8

MECÁNICA ONDULATORIA

El príncipe de Broglie

El 25 de noviembre de 1924, en su tesis de doctorado, el príncipe LUIS DE BROGLIE, físico francés que tenía a la sazón 32 años de edad, hermano de MAURICIO DE BROGLIE, que hemos citado por sus estudios sobre rayos X, echó los cimientos de la mecánica ondulatoria ampliando a toda la mecánica el novísimo concepto de la reunión de los corpúsculos y de las ondas, ya con la asociación de toda partícula en movimiento con una «onda de fase», ya con la sumisión de la dirección de los corpúsculos a «ondas pilotos», reunión que, en el caso particular de la óptica, comprende el fotón y la onda luminosa.

Así como la luz, desde la óptica, se había dirigido hacia el corpúsculo material de la mecánica para explicar el efecto fotoeléctrico, así DE BROGLIE, en el sentido inverso, llevó la materia desde la mecánica hacia la onda.

Estableciendo con toda amplitud las analogías posibles entre la mecánica clásica y la propagación de las ondas, LUIS DE BROGLIE hizo pues una «síntesis», que llamamos la «Mecánica Ondulatoria» y en que toda energía está asociada a fenómenos ondulatorios: Pero, en la dinámica clásica, con masa y energía enormes comparadas con la dinámica microscópica, según PLANCK, la longitud de onda es infinitamente pequeña con relación a los cuerpos.

En este caso, como en los fenómenos de óptica geométrica, el estudio de la onda puede ser despreciado, pues el estudio de las trayectorias (rayos) es suficientemente aproximado. En fenómenos como la difracción, por ejemplo, la acción de la onda sobre el rayo es tal que la simple consideración geométrica del rayo nos llevaría a soluciones groseramente erróneas.

El punto de partida de LUIS DE BROGLIE fué el modelo atómico de BOHR. Propuso considerar que giran «ondas» alrededor del núcleo atómico por el trazado de las órbitas estacionarias de BOHR, a las cuales atribuía longitudes de circunferencia múltiplos exactos de la longitud de onda de dichas «ondas electrónicas estacionarias». Esas ondas entraban pues dentro del átomo para formar parte constitutiva de la partícula material.

Se trata pues de una nueva generalización, semejante a las que imaginaba FARADAY; era la «asociación» o «ligamento» permanente entre onda y materia; era un nuevo puente lanzado en forma arriesgada por encima de mil dificultades.

Para la óptica, era la esperanza de reunir en una sola síntesis todos los fenómenos de la luz, aunque, hasta el momento, sólo logre abarcar los fenómenos neutrales, los fenómenos corpusculares y los fenómenos ondulatorios escalares, reclamando «nuevas hipótesis» para poder extenderse a los fenómenos ondulatorios vectoriales y a los

electromagnéticos. Y esas nuevas hipótesis parecen encontrarse en la teoría de DIRAC y tal vez en la de JORDAN.

LUIS DE BROGLIE imaginó su solución, impulsado por la necesidad de destruir la dualidad del fotón y de la ondulación; pero es preciso confesar que sus hipótesis hicieron progresos mayores en la mecánica de la materia que en la óptica misma, y que fueron las matemáticas, y no la experiencia, las que sacaron un enorme provecho de la idea inicial. La experiencia no apareció sino a posteriori, como ratificación de fórmulas. DE BROGLIE se basó en la similitud matemática entre la expresión del principio de menor acción utilizado por FERMAT en 1650, desde el punto de vista de la óptica geométrica, y la expresión de este mismo principio establecido para la mecánica por MAUPERTUIS, en 1740, y ampliado por EULER (1707-1783), LAGRANGE (1736-1813) y HALMITON (1805-1865). Esa similitud sugirió la relación buscada entre la materia y la radiación; para ello «se asocia» una onda con una partícula material en movimiento y se deduce que, para interpretar una onda como las vibraciones de un cuerpo en movimiento en el espacio o, viceversa, las vibraciones de un cuerpo en movimiento como una onda, debemos igualar el producto de la velocidad del cuerpo (v) con la velocidad de propagación de la onda (u) al cuadrado de la velocidad de la luz (c^2)

$$u.\ v = c^2$$

o sea:

$$u = \frac{c^2}{v}$$

y:

$$v = \frac{c^2}{u}$$

Pero como, por la teoría de la relatividad, la velocidad de la luz es un máximum para toda velocidad mecánica, para que *v*, velocidad del cuerpo, no sea mayor que *c*, velocidad de la luz, debemos admitir que *u*, velo-

cidad de propagación de la onda, debe ser mayor que la velocidad de la luz.

Ahora bien, esta relación entre la velocidad del cuerpo y la velocidad de propagación de la onda resulta ser la misma que la existente con la velocidad de un «grupo de onda», concepto ya establecido por la mecánica clásica.

Por consiguiente, el movimiento de una partícula material es equivalente al de un paquete de ondas; la velocidad individual de esas ondas sería mayor que la velocidad de la luz, pero su velocidad de grupo es igual a la velocidad de la partícula.

Podemos deducir de lo que antecede, el valor de la longitud de la onda asociada a la partícula material en movimiento.

De acuerdo con la teoría de la relatividad, la energía de una partícula es igual al producto de la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz (mc^2). Por otra parte, sabemos que esa energía es igual al producto de la constante de PLANCK por la frecuencia.

Por consiguiente:

$$h\ \upsilon = m\ c^2$$

Ahora bien, la longitud de onda (λ) es, por definición, el cociente de la velocidad de propagación por la frecuencia:

$$\lambda = \frac{u}{\nu}$$

y ya hemos visto que:

$$u\ v = c^2$$

Un simple cálculo nos dará pues:

$$h = m.\ v.\ \lambda$$

$$\lambda = \frac{h}{m.\ v}$$

o sea: La longitud de onda es igual al cociente de la constante de PLANCK por la «cantidad de movimiento».

Este valor de la longitud de onda establecido por DE BROGLIE se mantiene como el elemento fundamental de la mecánica ondulatoria a través de todas las hipótesis y variaciones propuestas por los físicos, como SCHRÖDINGER, DIRAC y otros.

La dualidad entre la onda y el corpúsculo parece firmemente establecida por la teoría y la experiencia, pero, como lo confiesa DE BROGLIE, «lo que significa exactamente esta dualidad es cuestión muy difícil, que está lejos de ser dilucidada».

Lo que realmente fué encontrado es, más bien que una verdadera fusión de la teoría corpuscular con la teoría ondulatoria dentro de la anhelada teoría general de la luz, un arreglo, combinación o clave que establece la relación entre la longitud de onda y la energía del fotón o quantum de luz con que se calcula, en cualquier sentido, el valor de la una en función de la otra.

Muchas explicaciones, imágenes o símbolos fueron imaginados para tratar de penetrar el misterio. Fueron las «ondas-pilotos» ya citadas; fueron las «nubes electrónicas»; luego fueron los «paquetes de ondas» de SCHRÖDINGER; fué la definición del corpúsculo hecha por DE BROGLIE como una «singularidad» en un fenómeno ondulatorio, o el concepto del mismo autor acerca de la realidad de la onda que ocupa una región del espacio mientras el corpúsculo es un punto material con cierta posición en la onda; fué también la negación hecha por HEISENBERG y BOHR de todo valor real de la onda que se vuelve «la simple representación simbólica de lo que sabemos acerca del corpúsculo», concepto cuya consecuencia es el «principio de indeterminación de HEISENBERG».

MEYERSON nos pintaba claramente la complejidad conceptual de la dualidad del corpúsculo-onda cuando decía: *«El físico de los cuanta se encuentra en una situación muy particular ya que se halla en presencia de dos imágenes, y éstas son absolutamente contradictorias e inconciliables en la imaginación. El físico, quiera que no, no puede pensar en algo que sea simultáneamente corpúsculo y onda, y debe limitarse a pensar en un objeto que sea alternativa-*

mente uno u otro» — (Con esta alternación volvemos al concepto newtoniano de «accesos»). «*Y*», continúa MEYERSON, «*entonces la noción misma del objeto tiende a palidecer en el físico, tiende a escapársele hasta tal punto que llega a limitar su pensamiento a la matemática pura, a no razonar sino como matemático*».

La admisión de esos conceptos, contradictorios si se les atribuye un aspecto físico real, es, según MEYERSON, la causa de la evolución del pensamiento científico provocado por los cuantistas.

DE BROGLIE dijo: «*El postulado fundamental de la mecánica ondulatoria es que, con toda partícula independiente, ya sea de materia o radiación, está asociada la propagación de onda, representando la intensidad de esta onda, en cada punto y cada instante, la probabilidad de que esa partícula asociada se manifieste en ese punto y en ese instante*». Aquí, pues, la onda pierde todo carácter de realidad física y adquiere el valor matemático de la probabilidad que permite determinar cuál es en la realidad, la distribución da las partículas (fotón, en óptica; electrones, protones, neutrones, en mecánica). Más adelante, volveremos sobre esta intervención de las probabilidades en la óptica y en la mecánica ondulatoria, intervención con lo cual la teoría de DE BROGLIE y SCHRÖDINGER se alejó de sus propósitos iniciales, deterministas de realidades físicas.

Los conceptos de LUIS DE BROGLIE no impresionaron mayormente en un principio y hasta la valiosa intervención de ERWIN DE SCHRÖDINGER, en 1926. Este profesor de Zürich, ampliando los conceptos de DE BROGLIE, dió la ecuación general de la propagación de las ondas asociadas al movimiento de un sistema cualquiera, dentro del concepto de probabilidad que acabamos de señalar. Los resultados de la ecuación no señalan pues la posición determinada del corpúsculo emisor de onda, sino la «probabilidad de su presencia».

Esta ecuación de SCHRÖDINGER, como tantos otros puntales de todo este moderno desarrollo de la física, funda su valor real mucho más que en una evidencia intrínseca

en su eficacia evidente en explicar o resolver graves dificultades teóricas o experimentales cuyo esclarecimiento permite seguir adelantando en esa arriesgada empresa conceptual. Y en esa ecuación surge otra magnitud, tanto o más misteriosa aun que la *h* de PLANCK; está representada por la letra ψ y su misión esencialmente matemática es eficaz en el planteo de los problemas referentes a la onda-corpúsculo. Exigirle pues una significación física real no parece imprescindible, ni siquiera sensato.

El desarrollo de la mecánica ondulatoria de DE BROGLIE y SCHRÖDINGER llega, por procedimientos clásicos del concepto de continuidad, a resultados coincidentes con los que obtiene la Mecánica Cuántica, con su concepto de discontinuidad.

Es así como aplicadas al átomo, sus ecuaciones ratifican, dándole mayor precisión en ciertos casos especiales, la teoría de BOHR en la determinación de los estados cuánticos y de la intensidad de las rayas espectrales.

Volvamos a mirar nuestro cuadro esquemático de teorías de la luz.

Vemos que, en conjunto y desde nuestro punto de vista de las teorías de la naturaleza de la luz, la mecánica ondulatoria, que esboza una síntesis capaz de abarcar los fenómenos neutros y los fenómenos corpusculares ya comprendidos en la doctrina del fotón y, además, los fenómenos ondulatorios escalares de la primera teoría de FRESNEL, encuentra ingentes dificultades en abrazar los fenómenos ópticos vectoriales (como la polarización), y los fenómenos electromagnéticos, que MAXWELL supo reunir en su síntesis que, si bien no fué tampoco general, fué la teoría que logró comprender el mayor número de fenómenos luminosos y radiantes conocidos en su época.

Veremos, más adelante, cómo DIRAC...

9

DAVISSON Y GERMER. — EFECTO RAMAN

DAVISSON (n. 1881) y **GERMER.** — En 1927, la realidad física de la mecánica ondulatoria recibió una brillante comprobación de parte de los físicos norteamericanos DAVISSON y GERMER, quienes demostraron experimentalmente que haces de electrones (partículas materiales en movimiento) producen fenómenos de interferencia, siendo determinable su longitud de onda con un resultado que coincide exactamente con las predicciones teóricas de la mecánica ondulatoria. $\lambda = \frac{h}{m\,v}$

Tal como la había previsto teóricamente y con toda precisión DE BROGLIE, varios años antes, la dualidad que él atribuyera a las ondas y a los corpúsculos de luz, fué también demostrada y descubierta en otras radiaciones materiales. Éstas fueron los rayos catódicos, es decir, corriente de electrones. Al mismo tiempo que GERMER y DAVISSON, realizaba experiencias similares G. P. THOMSON, hijo de J. J. THOMSON.

Allí pues apareció el hecho: los rayos catódicos, al pasar a través de cristales, producen interferencias como los rayos X, es decir, como típicas ondulaciones. Las fórmulas establecidas por DE BROGLIE, con anterioridad al descubrimiento experimental de dichas interferencias catódicas y basadas en la teoría de la relatividad de EINSTEIN, pudieron ser aplicadas al nuevo hecho con toda exactitud. En algunos casos, sólo podían utilizarse estas afirmaciones teóricas, pues los fenómenos en sí escapaban a toda posibilidad de observación experimental, como el caso de emisiones de átomos, por ejemplo. En este caso, el átomo podía ser considerado como el límite de lo microscópico en cuanto a la aplicación de la dualidad corpúsculo-onda, dualidad que forzosamente no es observable en los fenó-

menos realmente macroscópicos. Pero experiencias ulteriores (de STERN) comprobaron también la aplicabilidad de la ecuación de DE BROGLIE a fenómenos de difracción obtenidos con emisiones o corrientes, no ya de electrones sino de átomos. Y mientras un átomo proyectado en forma individual actúa como lo hiciera una simple bala (aspecto corpuscular), una corriente de átomos obra como ondulaciones de longitud de onda perfectamente determinada y de realidad física comprobable fotográficamente.

De todo lo dicho, podemos concluir que, aunque debemos reconocer que no nos representamos o explicamos, con un claro mecanismo, esa dualidad, es indiscutible que la síntesis se aclara, el puente se establece: las partículas materiales (electrones, átomos) dan lugar a fenómenos ondulatorios; fenómenos ondulatorios (rayos X, fotones) tienen manifestaciones mecánicas (como el efecto COMPTON). La mecánica de la materia entra pues dentro del cuadro de la óptica con la mecánica ondulatoria.

EFECTO RAMAN (n. 1888). — En 1928, los físicos hindúes RAMAN y KRISHNAN, renovando con un prolijo estudio espectroscópico la cuestión del azul del cielo que trató TYNDALL y, más tarde RAYLEIGH (1897), descubrieron en la difusión de la luz en los medios transparentes un nuevo «efecto», denunciado por la aparición de nuevas rayas espectroscópicas. Este «efecto RAMAN» se debe al choque entre átomos y fotones con una variación de energía del átomo, variación que provoca una modificación de la frecuencia de la luz incidente (1). Es ésta una nueva prueba a favor de la existencia del fotón, un nuevo fenómeno explicable sólo por la teoría de los cuanta, y lleno de sugestiones acerca del intercambio entre materia y radiación. (2)

(1) CASTELFRANCHI. *Física Moderna*, págs. 629-32.
(2) BACHELARD. *Le Nouvel Esprit Scientifique*, pág. 72.

10

MECÁNICA CUÁNTICA

Heisenberg

HEISENBERG. — Poco podremos decir en esta síntesis acerca de los fundamentos del desarrollo de la «mecánica cuántica» o «mecánica de las matrices», establecida por HEISENBERG desde 1925 y ampliada por BORN, JORDAN y DIRAC, pues estos sabios prescinden de conceptos sensoriales y, despreciando toda tradición física y toda imagen real del átomo, toman como base algunos valores perfectamente medibles, como las frecuencias y las intensidades de líneas espectrales o su contenido energético observado en los choques electrónicos, para entregarse a especulaciones matemáticas de enormes dificultades.

En julio de 1925 —cuando DE BROGLIE, después de la presentación de su tesis de noviembre de 1924 estaba absorbido por la elaboración de la mecánica ondulatoria— el joven físico alemán HEISENBERG envió una corta memoria a la *Revista de Física* con ideas y críticas fundamentales relativas a los nuevos conceptos espectroscópicos basados en la teoría cuántica y el átomo de BOHR. Las ideas de HEISENBERG, que fueron inmediatamente recogidas por su profesor MAX BORN y por JORDAN y DIRAC, se diferenciaban en absoluto de los conceptos de DE BROGLIE.

Debe señalarse, sin embargo, que no todos los físicos que elaboraron esta Física Nueva, como por ejemplo los mismos PLANCK y EINSTEIN, se dejan llevar a conceptos tan revolucionarios como lo hacen HEISENBERG, BORN, DIRAC o JORDAN. Ellos esperan aun que surja la solución capaz de esclarecer los actuales misterios o imprecisiones con conceptos con los cuales nuestro espíritu esté más familiarizado.

Por otra parte, SCHRÖDINGER, en 1926, con nuevas demostraciones matemáticas, basadas en una maravillosa

intuición, logró establecer equivalencia entre la mecánica ondulatoria y la mecánica de las matrices, y pudo conseguir así que las consecuencias de la una fueran en muchos aspectos complemento de las consecuencias de la otra.

Esas teorías, acordes o discordes, cuyos principios nos es imposible verter a la sencilla expresión de esta síntesis, sólo están a nuestro alcance en sus consecuencias, y vemos que de ellas surgen conceptos revolucionarios. El abandono por la física de sus baluartes más fuertes: el principio de causalidad y el determinismo, con la adopción de la estadística, de la probabilidad y del libre albedrío o del «principio de indeterminismo» de HEISENBERG, plantean problemas filosóficos de alcance insospechable, que modifican nuestros conceptos fundamentales acerca de la naturaleza y de cuya solución puede depender el porvenir de la ciencia.

11

DIGRESIÓN

Un nuevo estado de espíritu

El estado espiritual científico tan nuevo y particular en que se encuentra, o que se empeña trabajosamente en forjarse, el físico moderno, frente a la atomística nueva y sus fenómenos cuánticos «desafía la expresión verbal» tanto como los mismos conceptos de reciente introducción en la ciencia. Nos impone «desaprender» todo lo que acumulamos alrededor de conceptos arbitrarios sobre naturalezas simples y absolutas.

JORDAN nos dice en distintas partes de su obra *La Física del siglo* XX:

«La Física Cuántica es esencialmente más abstracta que la representación lúcida y tangible de la teoría atomística materialista... Los átomos de DEMÓCRITO eran indestructibles e invariables; las partículas elementales modernas (neutrones, electrones, protones, neutrinos, fotones...) están sujetas a transformaciones sin límites. Para DEMÓCRITO cada átomo, individualmente, tenía su propio destino y su identidad permanente; el electrón y otras partículas elementales no poseen para el físico moderno individualidad alguna... En fin la exis-

tencia del átomo no es ya un hecho básico y primario de la naturaleza; sólo es una parte especial de un fenómeno mucho más general y comprensivo: el fenónemo de las discontinuidades cuánticas caracterizado por el quantum de acción de PLANCK y sujeto a una comprensión completa y cuantitativa en fórmulas matemáticas... El hecho básico es la presencia de algo que desafía en absoluto la expresión verbal y puede solamente ser indicado aproximadamente con ese término de «discontinuidades»... El átomo que, hoy conocemos, ya no tiene las propiedades claras y tangibles del de DEMÓCRITO, está privado de toda cualidad sensorial, y puede sólo ser caracterizado por un sistema de fórmulas matemáticas... La pretensión de atribuir a los átomos cualidades tales como las que percibimos con el sentido del tacto o de la vista es tan arbitraria y superflua como lo sería la pretensión de atribuirle cualidades de color o de tono musical... Es de suma importancia filosófica el hecho de que la Nueva Física logró dominar el «fatalismo» que llegó a su pleno desarrollo en la Física Clásica. En el siglo pasado, se imaginó que los movimientos de los átomos eran regulados por leyes similares a las que rigen los movimientos del sistema planetario, de manera que toda la naturaleza en sus menores detalles fuera comparable a un perfecto reloj, cuya marcha, desde los orígenes hasta los tiempos más recientes, esté predeterminada con absoluto rigor matemático... Imaginad un espíritu pensante, infinitamente superior a nosotros en capacidad cuantitativa, pero poseedor cualitativamente de la misma habilidad pensante que nosotros. Tiene todas las cualidades de un matemático completo; en una fracción de segundo, lleva a cabo cálculos que ocuparían a todos los sabios del mundo durante millares de años. Además, por observaciones y experimentos, conoce las condiciones del mundo en cada detalle, en cualquier momento preciso del tiempo; él sabe cuál era, en aquel instante, la posición exacta y la velocidad de cada átomo. Ese espíritu, de tipo LAPLACE, sabría pues todo cuanto puedan saber jamás los sabios humanos. Para él, todos los acontecimientos del porvenir pueden ser calculados de antemano. Puede mirar atrás en el pasado; sus cálculos le revelan todos los crímenes misteriosos y las acciones secretas. Cada fibra del cerebro humano, en el pasado o en el porvenir, le es conocida con precisión y él puede calcular toda acción humana...

«La Nueva Física declaró que el cuadro del mundo científico así presentado (como lo hiciera con toda claridad DUBOIS-REYMOND) es absolutamente falso. Sabemos que no puede siquiera pensarse en una causalidad calculable de antemano en los procesos atómicos. Aunque esta causalidad y esta habilidad para el cálculo existan realmente en el sistema planetario, en la microfísica de los átamos y de los cuanta algo nuevo e imprevisible puede ocurrir en cualquier instante...»

Ya frente al concepto del electrón, en 1904, LANGEVIN decía:

«Las tentativas hechas hasta ahora para dar una representación concreta de ese desplazamiento de cargas eléctricas

y del éter, para dar una estructura al éter, permanecieron casi estériles. Tal vez se encuentre la dificultad en la naturaleza actual de nuestro espíritu, habituado por nuestra evolución secular a "pensar en materia", mientras que, según creo, debemos habituarnos a «pensar en éter», independientemente de toda representación material...»

Más tarde, en 1933, después de las innovaciones de DE BROGLIE y SCHRÖDINGER, de HEISENBERG, BORN, DIRAC y JORDAN, LANGEVIN se resistía aún a abandonar el determinismo, aunque renunciaba, sí, al mecanicismo de los cuerpos estructurados, como concepto microscópico elemental. Consideraba sobre todo que la «individualidad» sólo es una propiedad del cuerpo estructurado y no del elemento. *«Estoy convencido»*, decía, *«de que el carácter individual, en física como en biología, es un carácter que resulta de la complejidad de la estructura, y que el individualismo aislable y reconocible no aparece sino después de cierto grado de complejidad... Diversos argumentos pueden ser invocados a favor de esta idea. El más importante, en mi opinión, resulta del éxito de lo que llamamos las «nuevas estadísticas»... la de* BOSE - EINSTEIN *y la de* PAULI - FERMI, *que difieren de la estadística anterior (de* BOLTZMANN *y* GIBBS*) en que no atribuyen personalidad o individualidad a las partículas.»*

De esas simples citas, a las que podríamos agregar muchas otras, se desprende que, ante el nuevo cuadro de la microfísica atómica y cuántica en que reina el indeterminismo natural como reina el determinismo natural en la macrofísica, debemos crearnos un estado espiritual científico adecuado y nuevo, que, como lo decía más arriba, *«desafía la expresión verbal tanto como los mismos conceptos de reciente introducción en la ciencia...»*

El nuevo estado indeterminista de la ciencia la asemeja al estudio de los problemas biológicos y psicológicos humanos también indeterminables por rígida causalidad, y la acerca al estudio de la filosofía y de la religión, por estar como ellas alejado de la ciencia materialista. Por otra parte, es evidente la condición de inexpresabilidad de la ciencia moderna por medio de la terminología de la cien-

cia anterior, que nos era tan familiar que sus expresiones parecían tener una rígida y precisa acepción aun allí donde fueran sujetas a muy severas revisiones críticas. Todo ello concuerda en permitirnos cierta libertad en la creación de símiles aproximados a fin de tentar «expresar ese inexpresable». Es así que me permito introducir en esta exposición, y a manera de «recreo», una aportación personal que tal vez contribuya a sugerir en el lector poco familiarizado con las nuevas características de la ciencia, cuál puede ser nuestro estado espiritual frente a los fenómenos cuánticos.

El lector más competente, puede suprimir en absoluto esta simple imagen o relato... Echado en la arena de una playa, en un día de mucho sol, mis miradas se fijaron en un vuelo de gaviotas, a gran distancia y a cierta altura encima de la costa arenosa. En la blanca arena brillaba la luz solar en una atmósfera de por sí saturada de luz, y el aire vibraba de calor... (¿Era aquello, en verdad, un vuelo de gaviotas? No lo puse en duda, aunque mi observación sensorial del hecho era científicamente insuficiente; pero... la asociación de ideas con el lugar... la intuición... la analogía... recuerdos de experiencias anteriores... todo induce a admitir, sin vacilación ni comprobación, la suposición. Sin embargo, podría haber sido un vuelo de pájaros de otra especie o de insectos, o trocitos de papel sostenidos y agitados en el aire caliente por una corriente o un torbellino. Podría aún haber sido una ilusión óptica o manchitas en mi retina, debidas al encandilamiento del exceso de luz... No importa...)

Ese vuelo de gaviotas, (admitamos la premisa), evolucionaba en aquel lugar lejano, en masa imprecisa, de forma y de extensión incesantemente variadas.

Cada ave (presumo que según la posición de su vuelo caprichoso), ora se volvía una chispita de luz (cuando, sin duda, se reflejaba el sol en sus plumas lustrosas), ora desaparecía en absoluta inexistencia (tal vez, cuando las posiciones de sus alas reducían su imagen a un fino perfil), ora en fin era un punto oscuro y material (supongo que, cuando interceptaba en absoluto algunos rayos so-

lares). Las gaviotas —(o, más bien dicho, aquellos simples puntos visibles de luz o de obscuridad)— revoloteaban dentro de ese concepto o sistema oscilante y confuso, con movimientos locamente irregulares y caprichosos. Seguir el vuelo de una de ellas era tan absolutamente imposible que pensarlo hubiera sido pretensión absurda, pues ninguno de esos centenares o millares de vuelos entre cruzados era «predeterminado» y ninguna de esas gaviotas o puntitos tenía el menor rasgo de «individualidad». A cada instante, en lugares distintos e imprevisibles, sin regla ni orden, cada una presentaba un aspecto diferente: punto luminoso o punto obscuro... (¿onda? ¿corpúsculo?)... Aquellos foquitos de luz que se encendían y se apagaban en el aire soleado, a manera de luciérnagas diurnas, y esos puntitos materiales oscuros que brotaban, en generación espontánea, y luego se perdían en la diafanidad del aire, constituían un espectáculo a la vez cautivante y desesperante.

¿Cómo prever el próximo lugar de aparición de cada uno de esos puntos de luz o de oscuridad? ¿Cómo establecer o discriminar a qué punto luminoso, de fugaz aparición (previa a un período de total inexistencia), correspondía cada uno de esos puntos oscuros, de vida no menos fugaz e indeterminable? ¿Cómo trazar el camino recorrido por cada una de esas gaviotas, o puntos, todos idénticos, sin individualidad y de aspectos tan tenues? ¿Podía yo, acaso, con mis elementalísimos medios de observación, asegurar que existían realmente «trayectorias determinables» de una ave precisa, de tipo «gaviota»? ¿No debía limitar mis deducciones al conocimiento de esas simples apariciones y desapariciones de puntos luminosos y obscuros, en lugares y momentos imprevisibles y sin relación determinable entre sí?

¿Podía, además, hacer afirmaciones seguras acerca de la posición de cada punto y acerca de la duración de su aparición, si las vibraciones del aire caldeado y el encandilamiento quitaban toda posibilidad de observación certera?

¿Cómo pretender, en este estado de conocimiento, descubrir o imaginar rasgos, forma, posición, color, veloci-

dad, masa, desgaste de energía, etc., etc., de cada gaviota?

En la situación en que me encontraba, todos los medios corrientes de observación eran insuficientes y me impedían hacer afirmaciones y deducciones, establecer normas, pensar en leyes... Allí se necesitaba otra manera de razonar y encarar el problema. No era sensato pretender pensar en la misma manera que ante el claro movimiento de un ferrocarril o de un automóvil... ¿Cálculo de probabilidades?... ¿Mecánica estadística?... ¿No era éste el momento de recordar estas sencillas palabras de LANGEVIN?:

«*La mayor parte de los razonamientos estadísticos pertenecen a dos tipos principales bien conocidos por los matemáticos y que se introdujeron muy naturalmente desde la creación del cálculo de probabilidades. En un primer grupo de cuestiones, se trata de buscar la distribución o la configuración más probable que pueda tomar un sistema de partículas o elementos. En un segundo grupo de cuestiones, se intenta prever la importancia de las fluctuaciones espontáneas del sistema alrededor de esta distribución o configuración la más probable, aunque no la única posible, y que sólo se observa en promedio...*

En realidad, esas leyes se deducen con razonamientos perfectamente rigurosos, de postulados sencillos introducidos a priori en la definición de las probabilidades...» (1).

Ante ese hecho trivial, tuve, por cierto, la impresión de encontrarme frente a un problema de «otra naturaleza», que necesitaba «otro espíritu científico». Y pensé en BOHR, en HEISENBERG, en JORDAN... en la Mecánica Cuántica y la Nueva Física Atómica, con todas sus tendencias revolucionarias.

Pero me pareció oír la voz tranquilizadora de PLANCK o de EINSTEIN decirme:

«*Entendemos tu desconcierto, en el estado actual de tu conocimiento y ante las tendencias revolucionarias de tu espíritu científico, pero espera... Tal vez acercándote algo más, o con lentes de aumento, o cuando el día se vuelva*

(1) LANGEVIN. *La Physique depuis vingt ans*, pág. 195.

más gris, este problema te presente nuevas condiciones, capaces de asimilarlo a los problemas ya conocidos de dinámica macroscópica clásica... Esa posición indeterminista en la cual te encuentras en este instante es puramente subjetiva, es una simple incapacidad tuya y es sólo ocasional. Ten fe en la gran armonía de la naturaleza. Para ella, nuestro llamado «libre albedrío» es idea descabellada. No sólo hay relación entre los hechos sucesivos como entre una y otra nota de una composición musical, sino que hay, como en ella, una gran sinfonía de conjunto que algún día conoceremos...»

Pero a esa voz sucedía entonces, impaciente y llena de fe, la voz de JORDAN cuyas palabras textuales me volvían a la memoria: «*Esas opiniones de* PLANCK *y de* EINSTEIN *son puramente personales y están inspiradas en esperanzas de futuro que no tienen fundamento alguno en el estado actual de tu conocimiento. Estoy convencido de que los nuevos conceptos deben ser considerados concluyentes, y nuevos descubrimientos no podrán redundar sino en un estado más radical aun de esas tendencias revolucionarias.*

Esta es la Física Cuántica, esencialmente más abstracta que la representación lúcida y tangible de la teoría atomística materialista».

12

INDETERMINISMO. — ESTADÍSTICA. — LIBRE ALBEDRÍO

Dejemos esa digresión recreativa, la playa y su vuelo de gaviotas, y compilemos sintéticamente conceptos precisos. La crisis del determinismo y en general, las consecuencias filosóficas de las teorías de la física moderna son cuestiones de singular interés, ampliamente tratadas en obras especiales y cuyo desorrollo no puede revestir sino la forma de vago esbozo o elementalísimo resumen en un estudio de extensión restringida como éste.

No podemos plantear aquí el aspecto filosófico del principio de causalidad, tal como debiera desarrollarse en una historia de la filosofía pese al real interés que éste tenga para el estado actual de la física. Es, por cierto, aleccionador, en los momentos actuales, volver a meditar acerca de los conceptos filosóficos en cuanto a la causalidad... Recordemos a DEMÓCRITO, PROTÁGORAS, SOCRATES, PLATÓN y ARISTÓTELES, que nos señalaron la importancia del problema. Veamos a DESCARTES, que, con todo su racionalismo, al atribuir a la inextricable y omnipotente voluntad de Dios el origen de toda ley natural, supeditaba el determinismo a dicha voluntad, mientras que ESPINOZA definía a Dios mismo como orden perfecto y universal, confundiéndolo con el determinismo en sí, y LEIBNIZ consideraba la causalidad como sólo aparente, ya que Dios concedió a los seres y a las cosas sus propias cualidades de individualidad e independencia... Recordemos a los empíricos ingleses, LOCKE, HUME,... que se oponían a la admisión de una causalidad que existiera realmente más allá de la experiencia sensorial humana; recordemos a KANT, que consideraba la causalidad como «categoría» de organización intelectual, sólo admisible, pues, en nuestras representaciones humanas del mundo exterior de las «cosas en sí»...

Siguiendo la clasificación de COMTE acerca de la evolución del espíritu humano a través de los estados teológico, metafísico y positivo, veremos que «la causa» puede ser Dios, causa primera y causa final de todas las cosas, única causa segura y verdadera para el concepto teológico; puede ser un poder oculto, una acción misteriosa, para el concepto metafísico; y es la relación, empíricamente comprobada, entre un fenómeno y el fenómeno siguiente, con él relacionado en forma evidente y directa, para el concepto positivista.

Hasta el presente, se consideró que, por discutible que fuese la doctrina determinista en sí, y por artificial que pueda ser el concepto de relación entre causa y efecto, la supremacía del determinismo en el campo de la materia inerte debía mantenerse incontestable. Así como para la

Astronomía cuyo estudio de los astros reguladores del Destino fué la cuna del determinismo, todas las conquistas de la Física, especialmente las del método empírico, sus observaciones y sus experiencias, sus leyes y sus principios tanto como su rigurosa expresión físico-matemática, descansaron en una convicción incuestionable en un determinismo absoluto y especialmente en la rigurosa necesidad de una conexión invariable e incondicional entre causa y efecto.

El principio de causalidad y el determinismo se confundían, pues, en un solo concepto ya que, durante siglos, la ciencia los había identificado.

El determinismo es, sin embargo, más cuantitativo y más matemático que la simple causalidad. Mientras ésta sólo señala que los fenómenos se encuentran en una sucesión (seriación o secuencia), ordenada en sentido único en el tiempo, aquél le agrega la suposición de leyes rigurosas que rigen las relaciones entre causas y efectos. Puede haber pues, causalidad sin determinimo de rigurosa legislación; pero no puede haber determinismo sin la ordenación de la causalidad. La admisión conjunta de ambos, es decir, la admisión conjunta de un orden fundamental y de enlaces invariables, constituye el espíritu que animó toda la ciencia clásica. Es la visión que LAPLACE tuviera de un genio matemático que, en el universo, todo lo midiera, lo calculara y lo conociera, tanto en el pasado como en el porvenir, y sólo por medio de grandes principios claros y sencillos de una ciencia elemental y todopoderosa.

«*Debemos considerar el estado presente del Universo como el efecto de su estado anterior y como la causa del que lo siga*», dijo LAPLACE, firme en su fe en la causalidad. «*La ley de causalidad es*» dijo J. S. MILL, «*el pilar principal de la ciencia inductiva*». Y esas afirmaciones eran admitidas aunque ya se concebía le restricción subjetiva, como lo expresara MACH: «*No hay causa ni efecto en la naturaleza; la naturaleza simplemente es, ya que la conexión entre causa y efecto sólo existe en la abs-*

tracción que hacemos con el fin de reproducir mentalmente los hechos».

El empírico inglés HUME fundó la relación determinista de causa y efecto en procesos psicológicos, sensoriales, pues la consideraba sólo como el resultado del hábito adquirido por el observador cuando la experiencia le ha hecho ver repetidas veces una misma sucesión de hechos.

Cuando lo que llamamos efecto *es*, lo que llamamos causa *ya ha cesado de ser*, y vendrán luego otros estados de cosas que consideraremos efectos del estado actual sin que podamos afirmar que medie nada entre esos estados. Llamamos pues causa en esta serie de estados, sucesivos al estado anterior y efecto al estado inmediato, siempre que la repetición de series iguales de estados sucesivos nos haga llegar a la conclusión de que ese orden es inevitable y que parecen existir conexiones entre unos y otros estados.

Pero no podemos tener una seguridad absoluta en nuestra previsión, en nuestro pronóstico de hechos futuros, pues nada permite demostrar la existencia, ni aun la posibilidad de existencia, de semejante conexión. Bien lo afirma PLANCK: «*Puede decirse que la ley de causalidad es ante todo una hipótesis...*»; y agrega: «*Pero aunque sea una hipótesis, se trata de una hipótesis fundamental que representa el postulado necesario para dar sentido y significado a la aplicación de todas las hipótesis en la investigación científica...*»

Sólo podemos creer en la *probabilidad* de la repetición del mismo orden. Por esto dijo el profesor KARL PEARSON, «*La ciencia, en el pasado, es una descripción y, en el futuro, una creencia*».

Pero nuestra fe en el conocimiento de esta probabilidad de repetición de fenómenos sucesivos es tal que nos parece ser la verdadera explicación del fenómeno último, como si la observación de la anterioridad de otro u otros fenómenos nos hubiese hecho llegar a la causa primera.

En verdad no hacemos sino tirar de una larga cadena suelta, en lugar de cumplir con nuestro anhelo de sacar el agua clara y fresca del pozo profundo.

A esto se limitaba, en síntesis, el concepto real de determinismo y del principio de causalidad.

Fué este estado de cosas lo que más que ningún otro problema científico, vino a turbar el problema de la luz con la angustiosa dualidad corpuscular y ondulatoria. La crítica de conceptos y fundamentos de la ciencia clásica se hizo severa y agresiva; se señalaron sus errores, su desprecio de las excepciones e irregularidades o anomalías, su mutilación sistemática de los hechos y observaciones para satisfacer la clara ordenación ajustada al *a priori* del plan y la elemental accesibilidad de la explicación... Toda esta tendencia crítica ya había surgido anteriormente no sólo en filosofía sino en física, en mecánica, en la teoría cinética de los gases. Pero con el problema de la luz HEISENBERG no sólo hizo entrar en crisis al viejo conflicto, sino que, en lugar de hacer la crítica de los errores del determinismo en forma negativa, adoptó una actitud netamente objetiva y metódica desde su posición conceptual diametralmente opuesta.

Opuso al determinismo y al principio de causalidad, el «indeterminismo» con el «*principio de indeterminación*», o de «incertidumbre», basándose para ello en la afirmación de que es imposible determinar con exctitud y simultáneamente la posición y la velocidad de un corpúsculo.

Sin olvidar nunca la posición de historiadores de la ciencia con que estamos estudiando éste «nuestro tema» de las teorías de la naturaleza de la luz, nos sentimos tentados de salir en busca de antecedentes históricos acerca del concepto de HEISENBERG. Podríamos, tal vez, satisfacer este deseo remontándonos hasta ZENÓN (siglo IV a. J. C.), quien entre sus angustiosas paradojas, afirmaba que el movimiento no existe porque, descomponiendo hasta el infinito cada punto de la trayectoria, en cada uno de esos puntos el cuerpo está en reposo. Pese a su error de lógica, ZEZÓN planteaba ya el antagonismo entre la mayor precisión de la posición y la determinación del movimiento.

La imposibilidad establecida por HEISENBERG derivada del concepto del corpúsculo-onda y de la teoría cuántica, queda también comprobada en sentido práctico experimen-

tal. En efecto, si deseamos observar o fotografiar, por medio del microscopio, un corpúsculo, debemos hacer intervenir la luz. El corpúsculo nos aparece no como un punto material sino como un disco cuyo diámetro varía con la frecuencia de la luz, siendo inversamente proporcional a esa frecuencia. Por consiguiente, para lograr una mayor precisión en la observación, debemos elegir una luz de gran frecuencia. Pero, por otra parte, esta luz de gran frecuencia tiene un momento mayor, momento que comunica al corpúsculo observado por el choque del fotón (efecto COMPTON), modificando pues las condiciones de movimieto de corpúsculo. Vemos pues que todo lo que se haga para mejorar la observación directa de la posición del corpúsculo (luz de gran frecuencia) conspira contra una observación exacta de su momento o cantidad de movimiento, y viceversa todo lo que se haga para respetar el movimiento del corpúsculo (luz de poca frecuencia) conspira contra la observación de su posición.

Y si multiplicamos el valor de ambos errores o «indeterminaciones», encontramos que el producto es una constante y un múltiplo de h, la «constante de PLANCK» $\left(\frac{h}{2\pi}\right)$ Si este producto fuese igual a cero, lo que impondría que h fuese igual a cero, volveríamos al determinismo riguroso. Esta constante h, de tan pequeñísimo valor, es pues lo que sirve de límite al determinismo, y LUIS DE BROGLIE, en uno de sus bellos trabajos de divulgación, recordó esta expresión pintoresca: *El muro del determinismo tiene una fisura cuyo ancho es expresado por la constante de* PLANCK».

MAX BORN dice: «*El verdadero sentido de la constante* h *es por consiguiente que constituye la medida universal de la indeterminación introducida en las leyes naturales por la dualidad de ondas y corpúsculos.*»

JUVET (1) sintetiza el mismo concepto acumulando imágenes, de la siguiente manera: «*En resumen, la observación o la experiencia no pueden expresar fenómenos físicos en*

(1) *La Structure des Nouvelles Théories Physiques*, pág. 141.

el lenguaje del espacio y del tiempo con un rigor indefinidamente perfectible; las aproximaciones sucesivas de la experiencia y de la teoría tienen en él un límite; no pueden encerrar la realidad en las redes de mallas cada vez más pequeñas porque es imposible que su fabricación sobrepase una tenuidad medida por el número h. *O aun: la imagen que las teorías actuales nos dan del mundo está trazada en un papel que no es perfectamente liso, tiene un grano que deforma los detalles del trazo y su espesor es proporcional a* h».

Este indeterminismo, pues, aplicado al corpúsculo y desarrollado por la mecánica cuántica puede ser adaptado de la misma manera a las ondas de DE BROGLIE y desarrollado de acuerdo con la mecánica ondulatoria. Y, cualquiera sea la hipótesis, las probabilidades llevan al mismo indeterminismo.

Esta indeterminación *esencial*, es inevitable e ineludible para los fenómenos microscópicos. Existe también para los cuerpos macroscópicos, pero es tan reducido su valor con relación a las indeterminaciones *accidentales* debidas simplemente a la imperfección de los aparatos de medición, que puede ser totalmente despreciada y que puede ser mantenido para ellos un determinismo *aparente*.

Pero HEISENBERG, con la indeterminación, no niega toda causalidad, como tampoco EINSTEIN niega con la relatividad, la mecánica clásica. Ambos proponen una crítica más severa y un afinamiento de nuestros conceptos, y también un refinamiento de nuestros procedimientos, cuando, al querer aplicar los conceptos y procedimientos macroscópicos tradicionales a ambientes completamente nuevos, (microscópicos o astroscópicos), éstos resultan obstáculos a las investigaciones e hipótesis, exactamente como los prejuicios y tradiciones sociales son obstáculos para las resoluciones e innovaciones, en las leyes y costumbres.

Ante esta «incertidumbre» o «indeterminación» planteada por HEISENBERG, surgen, sin duda, posibilidades distintas de actitud interpretativa. Este límite de toda determinación de posición y movimiento de las partículas ínfimas de la materia puede ser considerado como una im-

posición real de la naturaleza, como una realidad en sí. Este límite puede no corresponder a la materia, sino «a nuestro conocimiento» y ser pues de carácter epistemológico. También puede ser simplemente un límite, (¿actual o definitivo?) de nuestras posibilidades técnicas, instrumentales, de observación y medida.

La naturaleza parece oponerse sistemáticamente a la observación simultánea de la posición y de la velocidad de los corpúsculos, y sólo permite determinarlas dentro de ciertos límites y predecir la *probabilidad* de que, dentro de un tiempo fijado, el corpúsculo se encuentre dentro de cierta región del espacio y que su cantidad de movimiento tenga valores comprendidos dentro de ciertos límites.

Por otra parte, no podemos (o ¿no sabemos?) tampoco determinar de antemano cuál será la trayectoria recorrida por dos corpúsculos después de su choque, ni a cuál de los átomos de un cuerpo radioactivo le corresponderá desintegrarse en un tiempo determinado. Estos hechos aparentan más bien ser dejados por la naturaleza al *azar* que a una predeterminación ineludible, siempre que esta impresión nuestra no sea fruto de nuestra ignorancia o de nuestra incapacidad para encontrar los antecedentes necesarios para la determinación.

Una simple comparación puede aclararnos este concepto. La estadística nos permite prever con una exactitud casi absoluta que, en una semana, morirán en una ciudad de un millón de habitantes un número determinado de personas, pero no nos permite en forma alguna determinar cuáles son las personas que fallecerán. El número parece pues determinado de antemano, mientras que la elección parece librada al azar. Sin embargo, el médico que estudia la historia clínica de cada una de las personas que fallecieron en esa semana puede descubrir las causas de su fallecimiento y, desde su punto de vista, la introducción del factor «azar» sería completamente ridícula.

Si no podemos ya confiar en leyes precisas que nos permitan prever con exactitud un estado de cosas después de un tiempo t a partir de un estado inicial perfectamente

determinado, podemos por lo menos anotar en el curso de numerosos ensayos cuál es el estado aproximado de cosas después de un tiempo *t* a partir de estados iniciales si no rigurosamente idénticos, tan iguales como lo permita nuestra observación. Lograremos así establecer una *estadística* de las probabilidades a las cuales dieron lugar esos estados iniciales. Indeterminación, probabilidad y estadística son caracteres típicos de la física moderna.

He aquí pues un triunfo del cálculo de probabilidades, magnífica ciencia que debemos considerar matemático-física, por su fundamento en hechos físicos reales y por su desarrollo de matemática pura, y que nos permite establecer leyes seguras, basadas —como lo dijera BOREL— en la «*certidumbre estadística*» en lugar de serlo en la «*certidumbre lógica*».

Ya BOLTZMANN y GIBBS introdujeron en la ciencia y particularmente en el estudio del universo microscópico, el concepto y el cálculo de probabilidades, propuesto anteriormente aun por MAXWELL en la teoría cinética de los gases.

Pero la falta de certeza, el cálculo aproximado y el azar ¿son pruebas de nuestra incapacidad material? o ¿son prueba de una indeterminación propia de la naturaleza? Sigue en pie el enigma.

El determinista opta por la primera solución y el indeterminista por la segunda.

JEANS expresa claramente la convicción indeterminista extrema cuando dice: «HEINSENBERG *nos hizo ver que la naturaleza aborrece la exactitud y la precisión por encima de todas las cosas*».

EDDINGTON, el gran defensor del indeterminismo (gran sabio de prestigio indiscutido en lo científico, pero de osadía filosófica, para muchos, desconcertante), rechaza la acusación de inmodestia provocada por tan categórica afirmación y considera, por el contrario, inmodesto al determinista cuando afirma que la naturaleza obra con una precisión que nadie ha podido comprobar, pues esto significa hacer una afirmación gratuita acerca del «*comportamiento*» del Universo. Agrega risueñamente EDDINGTON,

que él se siente indeterminista de la misma manera que es «*anti-luna-queso-ista*», no porque defienda una doctrina que demuestre que la luna no es un queso, sino porque el «*luna-queso-ismo*» es para él, como el determinismo, una suposición que no tiene interés en sostener. J. EDDINGTON llega a la conclusión absoluta y radical de que «*el determinismo ha desaparecido ya de la Física*».

Los deterministas, por su parte, contestan a estas afirmaciones atribuyendo la indeterminación «aparente» a la falta de eficacia de nuestros métodos de medición y circunscriben esa indeterminación al mundo simbólico de la física atómica. Más aun, encuentran en las indeterminaciones el modo de llegar al determinismo y a la exactitud de la naturaleza, pues, como lo expresa H. DINGLE: «*No tenemos derecho de considerar una esfera una figura indeterminada porque no podemos cubrirla con un género sin que se arrugue. Debemos, por medio del estudio de las arrugas, llegar a determinar la figura precisa de la esfera*». Los deterministas se exasperan sobre todo cuando, por una extensión de razonamientos, los indeterministas llegan a atribuir libre albedrío a la materia inorgánica, afirmación que EINSTEIN tilda de «*insensatez repudiable*» y que atribuye únicamente a nuestra impotencia frente a la observación detenida de los fenómenos microscópicos.

Como lo expresa claramente VAZ FERREIRA en dos de sus obras (1), hay muchas confusiones acerca del sentido de determinismo e indeterminismo. La más habitual y grosera sería la que consiste en oponer «determinismo» (que se refiere a fenómenos, estados, actos) con «libertad» (que es función de dependencia de un *ser* con relación al mundo exterior). Señala además el mismo autor la confusión entre «indeterminismo práctico, aplicado, pragmático», que sólo se refiere a la imposibilidad o impotencia científica de prever el porvenir, e «indeterminismo teórico, metafísico, ontológico», que afirmaría que no existen sólo necesidad o imposibilidad, o sea: el posible único,

(1) *Los Problemas de la Libertad y Transcendentalizaciones Matemáticas Ilegítimas.*

sino que es categoría ontológica, propiedad natural, la existencia de posibilidades distintas a la realidad que se efectúa. El error o equívoco consistiría entonces en pretender ampliar o «transcendentalizar» el principio de «incertidumbre» de HEISENBERG en un principio de indeterminación, en su sentido más profundo, es decir, en el sentido «teórico, metafísico, ontológico», cuando sólo puede admitirse en el sentido «práctico, aplicado, pragmático».

KARL DARROW criticó especialmente el uso de las palabras «incertidumbre» e «indeterminación» y cree que sería más ajustada la expresión de «principio de lo No-Definido».

METALLMANN trata de eludir el conflicto del determinismo y del indeterminismo observando primero que si ambos puntos de vista han conducido al investigador a grandes descubrimientos científicos de innegable certeza, puede presumirse que esos puntos de vista no son indispensables para la ciencia. Considera además que si BOHR ha podido ver en la mecánica cuántica una generalización de la mecánica clásica, siendo ésta admisible para fenómenos macroscópicos mientras aquella es indispensable para fenómenos microscópicos, podemos también ver en las leyes estadísticas actuales una generalización del determinismo para los fenómenos atómicos mientras que, para los fenómenos macroscópicos, este determinismo tenía el aspecto causal que le atribuía LAPLACE al tomarlo como base de la mecánica clásica.

Sabemos que BOLTZMANN introdujo el concepto de probabilidad y de estadística creando la mecánica estadística, pero sin considerar que las moléculas que intervenían en los fenómenos por ellos estudiados escaparan al principio de causalidad. Aquí la intervención de la estadística sólo se imponía por la imposibilidad nuestra de observar individualmente la actuación de cada molécula. En la mecánica cuántica, al contrario, la estadística está impuesta por la naturaleza misma, que en los fenómenos de transición cuántica obra con absoluto indeterminismo.

METALLMANN propone dar al determinismo un aspecto causal y un aspecto estadístico, como se da a la me-

cánica un aspecto clásico y un aspecto cuántico, respectivamente para fenómenos macroscópicos y microscópicos.

El problema está en discusión; y subsiste el dilema entre determinismo o indeterminismo absolutos, «ontológicos». El determinismo «práctico», del siglo XIX estrictamente causal, no parece poder subsistir; pero sería muy arriesgado proclamar el destierro definitivo del «concepto» determinista del campo científico.

13

LA SÍNTESIS ESPERADA

Son numerosas pues las digresiones filosóficas provocadas por los conceptos de la Física Nueva y son también numerosas e importantes sus consecuencias directas sobre varios capítulos de la Física, pero lo cierto es que, en la explicación de la naturaleza íntima de la luz, aun no ha llegado a la síntesis completa, tan ansiosamente esperada, síntesis que, por primera vez en la historia de la física, podría comprender todos los fenómenos ópticos conocidos. Tanto es así que es forzoso reconocer —como lo demuestra la simple observación de nuestro esquema inicial— que ninguna teoría abarcó, a la vez, mayor número de fenómenos ópticos que la teoría electromagnética de MAXWELL. Actualmente, debido al descubrimiento de nuevos fenómenos, nos encontramos más lejos que entonces de nuestro anhelo de síntesis general de todos los fenómenos ópticos conocidos.

Tenemos derecho, sin embargo, de esperar que esa síntesis pueda surgir del esfuerzo combinado de las teorías modernas, y LUIS DE BROGLIE, el glorioso fundador de la mecánica ondulatoria, nos señala un rumbo claro cuando afirma que para llegar a una teoría satisfactoria del fotón deberá emplearse, en primer lugar, una forma relativista de la mecánica ondulatoria; luego, en segundo

lugar, deberá introducirse un «*algo más*» para diferenciar el fotón de los corpúsculos elementales.

Y agrega que el primer punto de este programa puede realizarse de inmediato sustituyendo la forma primitiva de la mecánica ondulatoria por la forma ampliada dada por DIRAC (n. 1902) en su teoría del electrón magnético, teoría conforme a la relatividad, pues comprende todas las velocidades hasta la velocidad de la luz e impone a los corpúsculos energías y cantidades de movimiento en conformidad con las fórmulas relativistas. Esta teoría introduce además un elemento de simetría al cual conservaremos su nombre inglés de «*spin*», elemento que presenta un parentesco con la polarización y permite definir magnitudes de carácter electromagnético.

En una conferencia que DE BROGLIE pronunciara en el año 1937 en la Universidad de Lovaina, titulada *Vista General sobre la Historia de las Teorías de la Luz* (1), decía al respecto: «*La teoría de* DIRAC *impone a los corpúsculos energías y cantidades de movimiento conformes a las fórmulas relativistas, lo cual es esencial para volver a hallar las fórmulas einsteinianas fundamentales de la teoría de los fotones necesarios para la interpretación del efecto fotoeléctrico y del efecto* COMPTON. *Además es un hecho notable que la teoría de* DIRAC *introduzca automáticamente un elemento de simetría, el "spin", que presenta un parentesco claro con la polarización, y permite también definir magnitudes con carácter electromagnético: momento magnético propio y momento eléctrico propio, asociados al corpúsculo. Se ve pues qué progreso considerable realiza la teoría de* DIRAC *en el sentido de un acercamiento entre la mecánica ondulatoria de los elementos materiales y la teoría sintética necesaria para la intrepretación completa de las propiedades de la luz*».

(1) *Revue des Questions Scientifiques.* Louvain, mayo de 1937.

14

EL «SPIN»

¿Qué es el «spin»?

«Spin» es una palabra inglesa cuya traducción más acertada es «rotación»; aplicada al electrón nos hace inmediamente pensar en su rotación sobre su eje, movimiento con el cual completamos la imagen planetaria. En efecto, ya vimos con el átomo de RUTHERFORD, al que BOHR y SOMMERFELD agregaron todo aquello que los hechos y descubrimientos exigieron, el electrón girar como planeta alrededor del núcleo que figura el sol del sistema. Nada extraño, pues, que prosigamos la imagen y tratemos de encontrar en un movimiento de rotación del electrón la explicación o el descubrimiento de nuevos fenómenos, como consecuencia del desarrollo matemático de la premisa.

Esta sencilla explicación sería muy clara, pero el estudio un poco más detenido del «spin» pronto nos muestra cuán difícil es dar una definición o una imagen clásica de esta nueva entidad, como de cualquiera otra en ese mundo simbólico y esencialmente matemático en el cual hemos penetrado.

Para evitar una realización materialista simplista del «spin», ya que es discutida por los físicos su existencia real, pero para asimilarlo sin embargo a un concepto sencillamente accesible podemos considerarlo como una «propiedad» que caracteriza los electrones, complementando así las características que de ellos nos dan su masa, su carga eléctrica y sus órbitas (forma, dimensión, orientación), y propiedad a la cual corresponden dos magnitudes íntimamente ligadas y semejantes una a un momento magnético y la otra a un momento de rotación.

Si, sin embargo, no tememos hacernos una imagen más real del «spin», podemos lograrlo, como nos lo explica LUIS DE BROGLIE: el «spin» sería un movimiento de rotación del electrón «representándonos el electrón como una bolita de electricidad en rotación alrededor de uno de sus

diámetros y admitiendo que el momento magnético engendrado por esa rotación es igual a un magnetón de BOHR, mientras que el momento de cantidad de movimiento es igual a la mitad de la unidad cuántica $\frac{h}{2\pi}$ ».

Así que el momento de la rotación del electrón sería igual exactamente a la mitad del momento de su impulso, es decir a $\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$, condición con la cual se satisface la «cuantización» que caracteriza todos los movimientos periódicos atómicos.

Lo fundamental de la introducción del «spin» en la mecánica ondulatoria de DE BROGLIE y SCHRÖDINGER consiste en que se propone así dar a dicha teoría de conciliación entre el concepto corpuscular y el concepto ondulatorio, lo que le falta para que aspire a ser una teoría completa de la luz. «Lo que le faltaba» era nada menos que la explicación de la polarización (que había impuesto a FRESNEL la adopción de las ondas transversales) y la explicación electromagnética de la luz, propuesta por MAXWELL e impuesta por los fenómenos electro-ópticos. Volved a mirar nuestro esquema inicial de las teorías de la luz y veréis «lo que le faltaba» abarcar a la mecánica ondulatoria.

DIRAC se propone pues ofrecer el complemento necesario para dar a la teoría mecánico-ondulatoria de la luz elaborada por DE BROGLIE y SCHRÖDINGER el doble aditivo del magnetismo propio y del «spin» del electrón.

La concepción inicial del «spin» no se debe únicamente a DIRAC, pues, anteriormente a él, en 1926, los físicos holandeses UHLENBECK y GOUDSMIT fueron impulsados a imaginar esa entidad de la rotación del electrón ante el fracaso, frente a las anomalías del efecto ZEEMAN, tanto del electrón de LORENTZ como de sus imágenes modificadas por BOHR y por SOMMERFELD. En efecto, como solución a este problema, UHLENBECK y GOUDSMIT propusieron considerar el electrón como un pequeño imán

en rotación, dándole así un momento magnético y un momento cinético.

Esta nueva hipótesis dió excelentes resultados como supuesta causa posible de la estructura fina de las líneas espectroscópicas. Fué considerada pues de utilidad y admitida; y DIRAC encontró en esa hipótesis de los físicos holandeses las condiciones magnéticas y cinéticas que necesitaba para completar la imagen del electrón que derivaba de sus especulaciones matemáticas, y las condiciones que, aplicadas al fotón, permitieran satisfacer las exigencias electromagnéticas y ópticas (polarización) de la luz.

Llevando al concepto relativista la ecuación de las ondas de SCHRÖDINGER, para ampliarla a corpúsculos de enorme velocidad, DIRAC estableció su aplicabilidad al «spin» del electrón, que adquirió así las características cuánticas. Por otra parte, ese desarrollo relativista de la ecuación de SCHRÖDINGER por DIRAC lo llevó a la observación de que la expresión de dos soluciones de signo opuesto significaba la existencia de una energía de signo contrario al electrón, o sea un «antielectrón» o un electrón de carga positiva. En 1932, ANDERSON, en California, descubría experimentalmente ese electrón positivo tan proféticamente anunciado por DIRAC; y LANGEVIN dice al respecto: «*Este descubrimiento vino a traer una confirmación notable a la teoría del electrón de* DIRAC, *que previó la existencia del electrón positivo y el carácter efímero de esta existencia*».

Cuando estamos frente a un conjunto de corpúsculos, como en el átomo por ejemplo, la suma algebraica de los «spins» de los distintos corpúsculos será igual a un número entero de unidades cuánticas $\frac{h}{2\pi}$ o a un múltiplo de $\frac{h}{2\pi}$ más $\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$. En el primer caso se hablará de «spin par» y en el segundo de «spin impar».

De esta diferencia depende el carácter de esas entidades complejas, sobre todo desde el punto de vista estadístico, pues las de «spin par» siguen el método estadístico de

BOSE-EINSTEIN, igual que el fotón, mientras que las de «spin impar» siguen la estadística de FERMI-DIRAC, igual que el electrón.

En ello radica una íntima diferencia entre fotón y electrón, diferencia cuyo secreto nos escapa.

Estos dos métodos estadísticos reemplazaron la mecánica estadística clásica de BOLTZMANN limitada a temperaturas relativamente elevadas. Ambos consideran idénticos dos estados diferenciados sólo por la permutación de dos corpúsculos de misma naturaleza, pero mientras el método BOSE-EINSTEIN no limita el número de corpúsculos de mismo estado, el método FERMI-DIRAC impone la presencia exclusiva de un solo corpúsculo de un estado determinado, de acuerdo con el «principio de exclusión de PAULI».

Es decir que ese «principio de exclusión» no admite que en un mismo átomo pueda haber dos electrones que cumplan de la misma manera el conjunto de las características de órbita y de «spin». Esta condición se vuelve de por sí un principio de ordenamiento, pues limita y fija el número de electrones en las distintas regiones del átomo de acuerdo con las posibilidades de variaciones que puedan tener los electrones en dicha región. Entre esas variaciones posibles debe figurar la que corresponde a los dos sentidos, perpendiculares entre sí, que pueden ser atribuídos al «spin».

Lo realmente valioso de esas imposiciones apriorísticas con carácter de reglas empíricas es que encuentran comprobaciones de extraordinaria precisión en las más delicadas determinaciones espectroscópicas y provocan así nuevos descubrimientos que exigen nuevas hipótesis.

La determinación del «spin», agregado pues a la determinación de la masa y de la carga, permite conocer mejor la naturaleza de cualquier corpúsculo y clasificarlo mejor entre los nuevos corpúsculos que la ciencia ha descubierto o está a punto de descubrir, como los electrones (negativos y positivos), los protones (positivos y, tal vez, negativos) y los corpúsculos neutros: fotones, neutrones y neutrinos.

15

EL FOTÓN RENOVADO

Sabemos que los fotones de todas las radiaciones son idénticos en masa, carga y «spin» y que sólo varían en energía o sea en frecuencia ya que: $\varepsilon = h.\ \upsilon$. La masa y la carga del fotón pueden ser consideradas nulas o, por lo menos, despreciables. Por otra parte, ya que su «spin» obedece a la estadística BOSE-EINSTEIN, debe ser considerado como par, lo que induce a creer que el fotón está constituído por dos corpúsculos elementales que bien podrían ser, como lo sugiere DE BROGLIE, el corpúsculo imaginado por DIRAC y un anticorpúsculo (un fotón y un antifotón) cuyas relaciones entre sí serían comparables a las relaciones entre el electrón negativo y el electrón positivo, de reciente descubrimiento. Con esta combinación se explicaría la aniquilación de la masa del corpúsculo de luz como explicación del efecto fotoeléctrico con la desaparición del fotón; se explicaría la creación del campo electromagnético tal como lo exige la teoría de MAXWELL, y se lograría explicar la polarización.

Más aun, DE BROGLIE señala la comprobación de la existencia real de un fotón similar al que resulta de esta especulación, en la emisión de rayos β bajo el aspecto de un espectro continuo por los núcleos de cuerpos radioactivos, con una emisión secundaria de corpúsculos de masa infinitamente pequeña con relación al electrón. Son esos los corpúsculos que PAULI y FERMI llaman «neutrinos» y que los PERRIN, padre e hijo, llaman «ergones».

La reunión de un neutrino con su antineutrino podría constituir el fotón, siendo pues medio fotones que, reunidos, tendrían campo electromagnético, y que se adaptarían a los cálculos de DIRAC y a su concepto del «spin» explicativo de la polarización.

JORDAN llega a conclusiones parecidas, sin atribuir al fotón una existencia real; sólo se trata de una apariencia...

Pero, la solución es aún lejana y el misterio subsiste.

Tiene razón DE BROGLIE cuando afirma que falta un «algo más» para llegar a la síntesis general que explique todos los fenómenos ópticos y que pretenda descubrir el secreto de la luz, aquel secreto que, desde tantos siglos atrás, el hombre siempre ha creído estar a punto de penetrar.

Pero este «algo más» que aun falta ¿no es acaso eterno e invariable? Bien sabemos que sí; bien sabemos que surgirán nuevos fenómenos inexplicables, nuevos problemas insolubles, el eterno «algo» inalcanzable que nos separa de la Verdad, regida quizás, a su vez, por un gran principio natural que podría llamarse *«principio de la inalcanzabilidad»*. Los sabios son y siempre serán poetas, y si, algún día, llegaran a descubrir la Verdad, toda la Verdad, sin duda proseguirían en su bello empeño, y partirían en busca de «algo más», más allá de la Verdad.

Mientras tanto, se siguen acumulando, en magnífico botín, los descubrimientos de realidades físicas incontrovertibles, que contribuyen a la dicha real de la vida humana no sólo por las ventajas, las bellezas y las comodidades materiales que le proporcionan, sino por la fe que crean y ratifican, día a día, en el valor y el vigor de las fuerzas intelectuales que el hombre utiliza para la eterna conquista de la naturaleza en su eterna cruzada hacia los grandes misterios del Universo.

De esos misterios, será tal vez por mucho tiempo, quizás para siempre, el más profundo y enigmático, el más obsesionante y esquivo, el MISTERIO DE LA NATURALEZA DE LA LUZ.

LIBRO II

EL CALOR

EL NACIMIENTO DE LA TERMODINÁMICA

CAPÍTULO VII

EL CALOR

GENERALIDADES

1

LUZ Y CALOR

Hemos seguido, a través de los siglos, las alternativas de la lucha entre conceptos acerca de la naturaleza de la luz, y hemos asistido así a las peripecias de una larga cruzada, de una guerra santa, por la posesión de uno de los mayores misterios de la Naturaleza.

Lo hemos hecho aquí, no con actitud de investigadores actuales, o sea de luchadores activos de esa cruzada, sino con actitud de «cronistas», como aquellos que acompañaban a los reyes en sus hazañas y loaban sus proezas, hasta tal punto que la designación de su cargo se volvió, con significativa evolución etimológica, la de «coronistas».

Que hayamos nosotros obrado como «cronistas» o «coronistas» de la Edad Media, o como corresponsales de guerra de moderno estilo, poco importa; lo cierto es que nuestro relato intenta reproducir uno de los más apasionantes capítulos de la *Historia de la Ciencia.*

Entre los muchos episodios subyugadores de la Historia de la Física, hay otro de atractivo peculiar :el advenimiento de la termodinámica.

Recordaremos pues aquí con el mismo espíritu, a la Termodinámica... ese capítulo que engrandeció y rejuveneció el estudio del calor, y de la física toda, y de la ciencia entera, con descubrimientos tan trascendentales que enfrentaron bruscamente al sabio con el gran «¿por qué?» inicial y terminal del saber, con el inmenso signo de interrogación que es, a la vez, causa y fin de la vida intelectual de la humanidad. La Termodinámica es una de las creaciones científicas más típicas del siglo XIX, de ese siglo de las luces cuyo real valor es —al decir de RUSSELL— el haber iniciado la época *«en que la ciencia se convirtió en el importante factor que determina la vida cotidiana del mundo»* y en que *«esta ciencia ha causado mayores cambios que todos los que ocurrieran desde los días de los antiguos egipcios»*.

Mientras la física atómica se proponía resolver los misterios de la última y microscópica intimidad de los fenómenos particulares, la Termodinámica pretendía abarcar todo el vasto conjunto de los problemas cósmicos universales, en lejanísima previsión del devenir. Y esto, pretendía ella descubrirlo por medios estadísticos, frente a las probabilidades respectivas de todas las posibilidades de la naturaleza.

Establecer una íntima relación entre el estudio del calor y de la luz es, por cierto, un gesto de síntesis científica, pero de tan elemental lógica, que nos figuramos que debe haberle ocurrido, instintivamente, al primer hombre desde sus primera infancia, al sentir la luz y el calor aun indistinguibles e inexpresados en su espíritu y en su lenguaje, pero íntimamente fundidos en la caricia de un rayo de sol.

Fuera de esta elementalísima y evidente relación entre luz y calor como fenómenos naturales, nuestra reciente visión de la evolución de los conceptos científicos acerca de la íntima naturaleza de la luz nos ha conducido a la modernísima doctrina de los cuanta, que, como lo señalamos,

no fué originada por el estudio mismo de la luz, sino por el estudio de la Termodinámica, o, con mayor precisión, por el estudio de la energía radiante en el espectro de emisión del cuerpo negro.

He aquí pues un motivo mucho más actual que aquella sensación conjunta del hombre primitivo, para que agreguemos a nuestro estudio de las teorías de la naturaleza de la luz, un capítulo consagrado a la historia de la Termodinámica.

La Termodinámica, lo dijimos ya, fué creación absoluta del siglo XIX, aunque derivara del estudio secular del calor. Sus resultancias tuvieron alcances inesperados, dentro y fuera de la órbita de la Fisíca, y sus conceptos enfrentaron al físico, y a todos los sabios, con originalidades sorprendentes que llenaron su espíritu de angustia. Sin embargo, la Termodinámica con su derivación energética, comparada con la revolución de la Física Nueva, que desencadenar en el siglo XX la teoría de la relatividad y la teoría de los cuanta, puede ser considerada como una doctrina extremadamente prudente y cautelosa. Es que la Termodinámica no penetró en la misteriosa intimidad de los fenómenos elementales. Trató de relaciones globales entre cuerpos estructurados y grandes sistemas, mientras que la Física Nueva llevó sus investigaciones, con tremenda osadía, en el inobservable más allá microscópico.

Si afirmamos que fué la Termodinámica la que puso a PLANCK en el camino de su atrevido concepto de los cuanta, gracias al cual fueron renovadas todas las ideas acerca de la luz y nació toda una floración de hipótesis y teorías, debemos recordar que fué la luz la que puso el estudio del calor en el camino de la Termodinámica. Fué, en efecto, después de la maravillosa obra de FRESNEL, comúnmente llamada en el siglo XIX «estudio mecánico de la luz», cuando los físicos, por lógica analogía, emprendieron la edificación del «estudio mecánico del calor»; y de este estudio mecánico del calor nació la Termodinámica, la que a su vez engendró la Energética, cuyos conceptos originales apuntaron sus armas contra el concepto cinético.

Las alusiones, sin duda vagas y confusas, que acabamos de emitir acerca de períodos e incidencias en la evolución de los conceptos acerca del calor, sólo pretenden —con su misma vaguedad o confusión— estimular el interés por la mejor comprensión y ordenación de este interesante y sugestivo capítulo de la *Historia de la Ciencia.*

2

EL CALOR

Su Naturaleza — Conductibilidad — Termodinámica

El estudio del calor es, sin duda alguna, uno de los más antiguos de los estudios, pues el fuego fué una de las primeras y más apreciadas conquistas del hombre.

Vestigios del empleo técnico, industrial o doméstico del calor, remontan a unos 6.000 años antes de nuestra era, pero es de notar, no obstante, que las investigaciones científicas acerca de la naturaleza del calor son relativamente recientes y sólo tienen como antecedentes, especulaciones espaciadas, muy de tarde en tarde, a través de la historia.

Así como en la historia del estudio de la luz se siguen las alternativas de la larga rivalidad entre las teorías de las emisiones y de las ondulaciones, que parecen reconciliarse en la teoría moderna de LUIS DE BROGLIE, también permanecieron frente a frente, a través de los siglos, dos teorías que trataran de resolver el enigma de la naturaleza del calor: «flúido material», asegura la una, y «movimientos de las últimas partes de la materia», afirma la otra. La misma diferenciación de esas doctrinas plantea y supone reconocida la dualidad materia-energía.

Durante muchos siglos, los antiguos no distinguieron el calor del fuego, y ni siquiera a veces, de la luz que de éste resulta. Sólo en PLATÓN (427-347 a. J. C.), encontramos una distinción entre la causa (el fuego, «*elemento que penetra la materia*»), y su efecto (el calor, «*movimiento de las pequeñas partes de la materia*»).

ARISTÓTELES (384-322) veía en el calor «*un elemento oculto formado por partes en perpetuo movimiento*», y reunía así —en medio de ciertas vaguedades de dialéctica— los principios de las dos teorías, aun inexpresas.

Siglos y siglos transcurrieron sin que la ciencia nada agregara a estas imprecisiones sobre la íntima naturaleza del calor, aunque algunos sabios, como HERÓN DE ALEJANDRÍA (155 a. J. C.) o como LEONARDO DE VINCI (1452 - 1519) y PORTA (1538 - 1616), quince siglos más tarde, acrecentaron el caudal de conocimientos empíricos con la observación sistemática o fortuita de distintintos fenómenos caloríficos.

En el siglo XIII, ROGER BACON (1214-1294), expresó con claridad que la *causa* del calor es el movimiento interno de los cuerpos.

Casi cuatro siglos más tarde, merece ser recordada la opinión de KEPLERO (1571-1630), a favor del concepto del calor-movimiento, no obstante considerar este sabio que la luz es elemento material, pues, en su opinión, no era contradictoria esta disparidad de criterio entre el origen del calor y el origen de la luz, porque veía en el calor una cualidad, una propiedad y un «efecto» de la luz.

GALILEO (1564-1642), genial renovador de tantas partes de la física y verdadero iniciador de la era científica moderna, mantuvo el criterio del calor-flúido material, y se mantuvo sumiso, en este tópico a los conceptos de ARISTÓTELES.

FRANCISCO BACON (1561-1626), tan grande filósofo como ambicioso y deshonesto cortesano de la reina Isabel de Inglaterra, mostróse digno aquí de su homonimia con ROGER BACON, pues —contrariamente a GALILEO— sostuvo con ideas originales la tesis del calor-movimiento, en forma tal, que sus conceptos lo sindican como uno de los más felices precursores de las teorías modernas.

Su compatriota BOYLE (1627-1691), cuyo nacimiento coincide con la muerte de FRANCISCO BACON, defendió idéntico criterio y empleó la clara expresión de «*vibración de moléculas*», mientras que DESCARTES (1596-1650) hablaba también de «*agitación de partecillas de los cuerpos*».

NEWTON (1642-1727), pocos años más tarde, se declaró defensor del calor-movimiento y emitió, entre algunas apreciaciones vagas y no siempre concordantes, la afirmación de que el calor radiante es el resultado de una vibración del éter, medio al cual atribuía, en arriesgada hipótesis, (pese al célebre «*Hypotheses non fingo*»), la propagación de la gravitación, mientras negaba generalmente a ese ambiente hipotético la propiedad de propagar la luz. Y decimos «generalmente», porque varias partes de la obra de NEWTON demuestran, según la expresión de CORNÚ, «*los sufrimientos de un genio poderoso, atormentado por la duda...*».

Pero concretémonos al pleito entre las teorías del calor...

LEIBNIZ (1646-1716), el eterno y desdichado rival de NEWTON, comparaba las opiniones de éste sobre el calor-movimiento con las metafísicas «fuerzas ocultas» de los antiguos.

El célebre abate NOLLET (1700-1770), pretendía rechazar las mismas opiniones, arguyendo que el calor no puede ser movimiento, ya que «*el movimiento tiende de por sí a extinguirse, mientras que el fuego tiende a propagarse*».

Esta oposición de LEIBNIZ o de NOLLET, fué casi general en el siglo XVIII, a pesar de los argumentos favorables al concepto del calor-movimiento que se encuentran aislados en las obras de sabios como DANIEL BERNOULLI (1700-1782), JUAN BERNOULLI (1667-1748) y EULER (1707-1783).

Fué la época en que calor, luz, electricidad, magnetismo... eran asimilados a flúidos imponderables, distintos entre sí como distintas sustancias, y que penetran los cuerpos. Fué esa la época del triunfo del «flogístico» con que STAHL (1660-1734), el admirable revolucionario de la química, edificó sus teorías.

Y ese indefinible «flogístico» fué, además, confundido con el «calórico», término con el cual CRAWFORD (1748-1795) designaba «*el elemento, distinto del fuego y de la luz, que se manifiesta por calor cuando penetra la materia*».

Pero he aquí que los sabios holandeses GRAVESANDE (1688-1742), BOERHAAVE (1668-1738) y MUSSCHENBROEK (1692-1761), no contentos con admitir la materialidad del calor, plantearon por añadidura la cuestión de su ponderabilidad. Y esta desviación de la polémica no contribuyó, por cierto, a aclarar conceptos.

No es de extrañar, pues, que en el célebre trabajo que sobre este punto publicaron, en 1780, LAVOISIER (1743-1794) y LAPLACE (1748-1827), se observe una continua vacilación entre las dos teorías, seguida por una proposición de conciliación entre ambas y, en fin, cediendo al ambiente, terminada con el reconocimieto del calórico material. Mientras tanto, una contraofensiva se preparaba, y dos grandes victorias la señalaron.

Los partidarios del calor-flúido imponderable, atribuían el calor producido por el frotamiento de los cuerpos a la disgregación de una parte del cuerpo y a una pérdida de calor de esta parte, porque —según ellos— «*un cuerpo en polvo tiene menos capacidad calorífica que entero*».

RUMFORD, o sea Benjamín Thomson, conde de Rumford (1753-1814) —sabio físico norteamericano que fué sucesivamente maestro de escuela, oficial del ejército inglés, miembro de la Sociedad Real de Londres, oficial del ejército austríaco y general en jefe, ministro de la guerra y conde en Baviera— realizó, en 1798, las célebres experiencias que destruyeron aquellos argumentos de los defensores del calor material.

Taladrando un cañón bajo agua, el frotamiento llevaba a ésta hasta la ebullición, y RUMFORD demostró que no puede atribuirse este calor a la pequeña cantidad de metal desprendido, sino sólo al frotamiento, que es fuente inagotable de calor, calor que no puede ser, por consiguiente, sustancia, sino movimiento.

DAVY (1778-1829), al año siguiente, dió un nuevo golpe a las hipótesis tambaleantes de los defensores de la teoría del calor-materia, cuando demostró que, a pesar de tener el agua una capacidad calorífica doble del hielo, si se frotan dos pedazos de hielo en un ambiente a 0° C,

este frotamiento produce calor suficiente para provocar la fusión del hielo. Pero es de justicia recordar que DAVY no logró interpretar de inmediato, con el debido acierto, sus propios experimentos, y sólo varios años más tarde (1812) llegó a sacar de ellos deducciones concluyentes. Es de estricta justicia también establecer que las experiencias de DAVY no tenían, por añadidura, las condiciones de minuciosidad y precisión que son el mayor mérito de las experiencias de RUMFORD.

Llegamos así al umbral el siglo XIX, de ese siglo en que «tantas verdades y tantos errores han estallado con igual estrépito», según el decir de DUHEM.

Al terminar el siglo XVIII, la primera batalla entre los dos conceptos acerca de la naturaleza del calor había sido librada, y quedaban frente a frente las fuerzas rivales. De un lado, los defensores del «calórico» con CRAWFORD a su frente, y del otro, los innovadores, partidarios del calor - movimiento, entre los cuales se destacaban: DAVY, RUMFORD, TOMÁS YOUNG y AMPÈRE.

Es que aun no reconocían su derrota los partidarios de la teoría material del calor; pero una nueva batalla se preparaba...

Fué una batalla decisiva... si en ciencia puede hablarse de algo definitivo, de algo permanente... Y los vencedores volvieron de la gloriosa empresa con un magnífico e inesperado trofeo: la Termodinámica.

Es importante señalar aquí que, en el estudio del calor, se distinguen claramente dos corrientes distintas que raras veces se mezclan entre sí. Una se dirige hacia la dilucidación de la propagación del calor, la otra hacia dos fines muy distintos: la mejor utilización industrial del calor en las máquinas y los conceptos más amplios y hasta metafísicos acerca del calor en el Universo. Esta segunda corriente es, como lo habréis adivinado, la Termodinámica.

El estudio de la propagación del calor en cuya historia no nos detenemos por no ser éste «nuestro tema», utilizó métodos experimentales y de análisis matemático de una gran claridad y de rígida línea metodológica. Allí se des-

tacaron NEWTON, RICHMANN, FRANKLIN, INGENHOUSZ, RUMFORD, hasta que apareció, en 1827, la *Teoría Analítica del Calor* de FOURIER, con la ecuación general de la propagación del calor. La obra admirable de FOURIER señaló en este estudio grandes rutas que los sabios posteriores siguieron en fecundos desarrollos de un plan genial.

Mientras tanto, la corriente, menos serena y recta, de la Termodinámica llevaba a otros sabios, ya hacia los activos astilleros de la técnica industrial con utilitarias soluciones del mayor aprovechamiento de la energía, ya hacia los sitios más pintorescos, sorprendentes y a veces engañosos, de misteriosos problemas filosóficos acerca de la naturaleza.

CAPÍTULO VIII

TERMODINÁMICA

1

LOS DOS PRINCIPIOS

La Termodinámica, con sus vastas consecuencias físicas en particular, científicas en general, y filosóficas, descansa sobre dos grandes principios: el primero proclama la conservación cuantitativa de la energía y el segundo la necesidad de una diferencia de temperatura en las máquinas térmicas y lleva al concepto de la entropía.

La Física llama a esos principios: primero y segundo principios de la Termodinámica, de acuerdo con el orden en que acabamos de citarlos, *orden contrario al orden cronológico de producción aunque fiel al orden histórico de desarrollo.*

Esta afirmación aparentemente confusa y contradictoria, exige una aclaración:

El «Primer Principio de la Termodinámica» o «Principio de la Conservación de la Energía», fué descubierto y divulgado hacia 1840.

El «Segundo Principio de la Termodinámica» o «Principio de Carnot», fué establecido en 1824 por SADI CARNOT.

Esta denominación de «Primero» y «Segundo» principios es, pues, «*contraria al orden cronológico de producción*», como acabamos de afirmarlo.

Pero agregamos que esta denominación es «*fiel al orden de desarrollo científico*». En efecto, el principio descubierto por CARNOT en 1824 —o sea casi veinte años antes del descubrimiento del llamado primer principio— sólo adquirió importancia para la evolución de la ciencia como *consecuencia* de éste y gracias a la eficaz intervención de CLAUSIUS y de KELVIN, hacia 1850.

Queda, pues, aclarada la aparente contradicción de nuestra afirmación, y queda expresada la causa por la cual podremos dar preferencia, aun en una exposición histórica, al «orden didáctico» y no al «orden cronológico».

2

EL PRIMER PRINCIPIO

Mayer — Joule

El estudio histórico del Primer Principio de la Termodinámica ofrece dificultades que amplían su valor y acrecientan nuestro interés.

Cuando estudiamos por vez primera este apasionante capítulo de la historia de la ciencia y consultamos para ello las obras más corrientemente a nuestro alcance, de OSTWALD, TYNDALL, TAIT, DUHEM, DUMAS, BRUNHES, POINCARÉ, ARIÈS, GUILLEMINOT, BOUSSINESQ..., las historias de HOPPE, PITONI, DAMPIER, BORDEAUX..., los tratados de CHWOLSON, WATSON, MOUTIER..., los artículos o lecciones de VERDET, BERTRAND, MOURET... nos desconcierta la falta de concordancia en la apreciación de los acontecimientos y sobre todo en las conclusiones de orden histórico que esos acontecimientos provocan.

Cada uno de esos respetables autores parece hacer la defensa de un sabio determinado y, para ello, reduce, cuando

no niega, los méritos de los sabios que otros autores tratan de adjudicar por procedimientos análogos.

Sin duda alguna, la causa principal de la discordancia acerca de la apreciación de los valores relativos de la intervención de los distintos constructores de la Termodinámica, se debe a las propias convicciones de los comentaristas acerca de las ideas y doctrinas, apasionadamente discutibles, que sostuvieron los distintos obreros de ese fecundo capítulo de la física.

Sin pretender, de manera alguna, poner en duda la buena fe de aquellos y otros renombrados autores, no podemos negar que, en muchos casos, aunque en grado variable, influyeron también, y hasta prevalecieron a veces los sentimientos patrióticos en esa extraña contienda que se prolongó durante tantos años y que adquirió en ciertos momentos el aspecto de discusiones acerbas y personales (1).

El espacio de que disponemos, no nos permite recordar aquí todas esas interesantes discusiones, pero nos proponemos hacer algo así como un balance general de las mismas, sin perder de vista en nigún instante estas palabras —o este consejo— de MACH: «*Por más que se aprecien los trabajos originales de* MAYER, *no se debe por ello apreciar menos el mérito de los físicos de carrera,* JOULE, HELMHOLTZ, CLAUSIUS, THOMSON, *que hicieron mucho, tal vez todo, para asegurar y completar el nuevo concepto en sus detalles. Suponer de su parte una apropiación de las ideas de* MAYER *nos parece absolutamente inútil. Múltiples manifestaciones simultáneas de una misma idea no son cosa nueva en la historia. Es deplorable que, bajo pretexto de justicia, se injurie a hombres cuya vida hubiera sido apacible y altamente honrada, aunque no hubieran dado a la ciencia sino la tercera parte de los progresos que les debemos de verdad...*».

Podríamos buscar antecedentes lejanos del descubrimiento del principio de la conservación de la energía en todo

(1) Véase en *Lectures on Some Recent Advances in Physical Science* de P. G. TAIT su discusión con DUBOIS-RYMOND, de la Academia de Ciencias de Berlín acerca de su mutuo «patrioterismo científico».

lo que, en las obras de los antiguos y de los modernos, tenga alguna relación con el concepto de permanencia, de invariabilidad, de transformación o de conservación del movimiento, de la fuerza, de la cantidad de movimiento, de la fuerza viva o del trabajo. El concepto de «conservación» es de por sí, una idea «a priori». Entre los nombres y hechos que, a manera de antecedentes, podríamos acumular, los que más se destacarían, sin duda, son los de DESCARTES y LEIBNIZ. Ambos expresaron «a priori» que, a través de todos los fenómenos y modificación de sistemas de cuerpos, debe haber una magnitud que se conserva constante y que el efecto podría restituir intacta a la causa. DESCARTES atribuía esta constancia a la cantidad de movimiento (m. v.), mientras que LEIBNIZ, corrigiendo su error, reemplazaba la «cantidad de movimiento» por la «fuerza activa» (es decir, la «fuerza viva», $m.v^2$). Ambos autores admitían que si, aparentemente, esa magnitud disminuye en un sistema de cuerpos, es que se ha distribuído entre sus partes mismas, o, según la expresión de LEIBNIZ: «*Las fuerzas no son destruídas sino diseminadas entre las partes mismas, No es perderlas sino hacer como los que cambian dinero grande en pequeño...*».

Si pensamos que DESCARTES y sus partidarios, como el mismo LEIBNIZ, atribuían el calor a pequeños movimientos de las partes de los cuerpos, poco faltaba en verdad para unir esas ideas y concebir la posibilidad de que esas fuerzas «diseminadas entre las partes mismas», allí se vuelvan calor; la idea de la equivalencia entre trabajo y calor estaba pues allí muy cerca. En el siglo XVIII, cuando cundió la boga por los flúidos materiales a los cuales se reducían todas las formas de energía (y sobre todo el calor con el «calórico»), fué olvidada la idea de conservación que parecía asomarse en los razonamientos de DESCARTES y LEIBNIZ.

Lo cierto es que esos antecedentes no influyeron mayormente sobre la evolución de la ciencia en general o no tienen relación directa con la aparición del Primer Principio de la Termodinámica, en la primera mitad del siglo XIX.

Los nombres más real y estrechamente unidos al nacimiento de este primer principio, son los de RUMFORD, DAVY, FARADAY, SADI CARNOT, MOHR, SEGUIN, MAYER, GROVE, JOULE, COLDING y HELMHOLTZ, nombres que acabamos de citar a la usanza de los programas de teatro o sea «por orden de presentación en escena».

No iniciamos esta lista con el nombre de NEWTON, pese al intento de TAIT de demostrar que su genial compatriota «*estaba en posesión de un gran número de los hechos principales relativos a la conservación y a la transformación de la energía*» cuando expresó la tercera ley del movimiento de la manera siguiente: «*Si la acción de un agente es medida por el producto de su fuerza y de su velocidad, y si la reacción de la resistencia es medida asimismo por las velocidades de sus diferentes partes multiplicadas por sus diferentes fuerzas, pudiendo éstas provenir del frotamiento, de la cohesión, del peso, o de la aceleración, la acción y la reacción en todas las combinaciones de las máquinas, serán siempre iguales y contrarias*».

Y no incluímos el nombre de NEWTON, porque, si bien es verdad que, como lo afirma TAIT, «*si* NEWTON *hubiese conocido este hecho* (o sea: la producción de calor por frotamiento y la proporcionalidad entre la cantidad de calor y la cantidad de trabajo), *no hubiera tenido dificultad en pasar de su enunciado tan claro al principio moderno de la conservación de la energía*», lo cierto es que NEWTON no conoció ese hecho y no llegó, pues, a dicho principio, ni pudo lógicamente prever su importancia científica. Y es fundamental observar que, en este descubrimiento, lo principal no es la expresión del principio en sí, que tal vez podríamos encontrar en alguna forma desde los tiempos más remotos, sino que lo principal es la previsión de las consecuencias, alcances e importancia del principio para la ciencia.

Es así que, con el mismo criterio adoptado por TAIT, podríamos encontrar en DESCARTES, en LEIBNIZ, en HUYGHENS y, sin duda, en muchos otros sabios anteriores, otros tantos «posibles precursores» de éste y de muchos otros descubrimientos científicos.

Dejando pues de lado, con todos los respetos debidos, a NEWTON, iniciemos ahora el pleito de cada uno de los sabios cuyos nombres hemos incluído en nuestra lista anterior:

Acerca de RUMFORD y de DAVY, las opiniones de los autores no denotan disidencias graves. Se reconocen en sus experimentos, fuertes pilares de la construcción de la teoría moderna del calor, pero nadie puede reclamar para esos sabios título mayor que el de «precursores de la Termodinámica», título que merecen justicieramente por haber demostrado, conjuntamente con su convicción en el concepto del calor-movimiento, que un trabajo produce calor y que éste es proporcional al trabajo que lo engendra y no a la materia que le sirve de substractum.

FARADAY (1791-1867), el admirable inventor, de virtudes ejemplares, también debe figurar como precursor, pues, en el curso de su larga obra, expresó con frecuencia que uno de sus ideales científicos era la demostración de la unidad de las fuerzas de la naturaleza. Llegó aun a emplear la expresión de «*convertibilidad de las fuerzas*»; contempló la posibilidad de la determinación de una relación fija entre las fuerzas, y consideró imposible el movimiento perpetuo. Pero estas acertadas y felices afirmaciones de FARADAY no pertenecen a su fuerte obra experimental, sino a sus escritos especulativos, que carecen de responsabilidad científica, aunque estén —al decir de TYNDALL— «*iluminados por fulgores de una sagacidad adivinadora que asombrará a los entendidos en las edades futuras*».

SEYFFER cometió, pues, una injusticia al pretender oponer a los derechos reales de sabios como MAYER, el prestigio de FARADAY y, más aun, al pretender presentar a MAYER como un especulador superficial frente a FARADAY, experimentador seguro, cuando, en este caso excepcional, la inversa sería, si no rigurosamente exacta, por lo menos no tan injusta.

SADI CARNOT (1796-1832), el genial e indiscutido creador del 2º principio, tiene serios derechos para figu-

rar entre los fundadores del 1.er principio, y es, por consiguiente, errónea la creencia generalizada de que CARNOT compartía el criterio imperante en el siglo XVIII acerca del calórico material.

Esta equivocada apreciación acerca de CARNOT, se debe al hecho de que este ingeniero atribuyó a su descubrimiento del llamado 2º principio, una utilidad inmediata y práctica para el mejor aprovechamiento del calor en la máquina de vapor, y con tal fin, se apresuró a expresarlo en su célebre Memoria de 1824, adoptando la terminología corriente en la época, o sea la que concordaba con la hipótesis del calórico material, pero así lo hizo con el solo fin de que sus explicaciones fueran más accesibles para sus contemporáneos.

Por otra parte, una lógica interpretación de los trabajos de CARNOT demuestra que éste no podía tener fe en esa hipótesis. Tenemos, en fin, la prueba documental indiscutible de ello, pues, en uno de los trabajos que escribió en el transcurso de los ocho años que separan la publicación de sus *Reflexiones sobre la Potencia Motriz del Fuego* y su tan prematura muerte, hizo afirmaciones tan categóricas como la siguiente: «...*Puede afirmarse, en tesis general, que la potencia motriz existe en cantidad invariable en la naturaleza y que jamás puede ser verdaderamente producida ni destruída. En verdad, sólo cambia de forma, dando lugar ya a una clase de movimiento, ya a otra, pero jamás se aniquila...*»

Desgraciadamente, estos manuscritos de CARNOT sólo fueron conocidos cuarenta y seis años después de su muerte, o sea, en 1878, cuando su hermano, el senador Hipólito Carnot, los entregó a la Academia de Ciencias de París.

La muerte temprana, que no permitió a CARNOT desarrollar sus ideas, y la publicación tardía de esos manuscritos, despojaron a este sabio genial de sus «derechos legales» para ser considerado como uno de los grandes fundadores del 1.er principio. Pero esas circunstancias adversas no lo privan de sus «derechos morales» a nuestra

ilimitada admiración, admiración que encierra, además, una protesta, tan violenta como vana, contra el injusto destino que cortó esa vida excepcional en pleno florecimiento y quiso que ese genio muriera ignorado, sin conocer, sin imaginar siquiera, la gloria que acompañaría su nombre a través de los siglos.

CARLOS FEDERICO MOHR (1806-1879), célebre químico y farmacéutico alemán, autor de obras clásicas relativas a su especialidad, emitió, en 1837, ideas favorables a la conservación de la energía, pero no realizó experimentos comprobatorios ni dió prueba de haber apreciado la trascendencia del principio.

El trozo que reproducimos a continuación, es prueba indiscutible de la claridad con que MOHR supo emitir su concepto: «*Fuera de los 54 elementos químicos, sólo hay en la naturaleza de las cosas un agente, que se llama energía* («Kraft», literalmente fuerza). *Este agente puede, según las circunstancias, aparecer bajo forma de movimiento, de afinidad química, de cohesión, de electricidad, luz, calor o magnetismo, y, con cada una* de *esas manifestaciones, pueden ser producidas las otras*».

El sabio inglés TAIT defiende esos derechos relativos de MOHR, pero sólo parece hacerlo para poder rebajar al mismo nivel, o aun a un nivel inferior, los derechos de MAYER, considerando así a ambos sabios como simples especuladores filosóficos que se hubieran limitado a emitir «a priori» el principio de la conservación de la energía. Fuera de la razón patriótica, podemos encontrar el motivo del desprecio de TAIT por la obra de MOHR y de MAYER en que —por ser típicamente inglés— atribuía una enorme importancia a la demostración experimental del hecho científico y restaba valor al descubrimiento intuitivo del concepto teórico.

Para nosotros, la verdadera razón por la cual MOHR no merece ser considerado como fundador —sino simplemente como precursor— es que no demostró haber apreciado la trascendencia del gran principio cuyo contenido tuvo, sin embargo, el mérito de vislumbrar con indiscutible nitidez.

MARCO SEGUIN (1786-1875), el conocido inventor de la caldera tubular, desarrolló en su obra de 1839, *Influencia de los Ferrocarriles*, ideas que le fueron sugeridas por su tío, el célebre MONTGOLFIER (1740-1810), acerca del «*enlace que debe existir entre el calor y el trabajo mecánico*».

SEGUIN es otro de los ya numerosos precursores de la Termodinámica, pero no puede merecer título mayor, como pretendió atribuírselo el gran químico DUMAS, impulsado, sin duda, por sentimientos patrióticos, ya que SEGUIN era, en la época, el único francés cuyo nombre figurara con ciertos derechos en la historia del 1.er principio.

La principal preocupación de SEGUIN parece haber sido comprobar la no materialidad del calor, demostrando que, en una máquina de vapor, no llega al condensador la misma cantidad de calor emitida por la caldera. Pero SEGUIN no logró realizar este experimento, que fué cumplido con éxito unos veinte años más tarde por el mecánico francés GUSTAVO HIRN (1815-1890).

Hasta el momento, hemos descartado, con juicios someros, a RUMFORD, FARADAY, SADI CARNOT, MOHR y SEGUIN para el título de «fundador del Primer Principio de la Termodinámica»; haremos otro tanto con GROVE y HELMHOLTZ.

GROVE (1811-1896), abogado y físico inglés, autor de interesantes trabajos de electricidad, sólo defendió ideas similares a las de MAYER, con posterioridad a éste y sin darles el mismo alcance. Su nombre es, por consiguiente, fácilmente eliminable de la lista de pretendientes.

HELMHOLTZ (1821-1894), el genial físico, matemático y biólogo alemán, sólo se ocupó de Termodinámica después de 1847, ampliando magistralmente la obra de sus predecesores, extendiéndola a toda la física conocida y dándole la fortaleza del concepto mecánico y del análisis matemático.

Algunos hechos inducen a creer que HELMHOLTZ cometiera en un principio, el error de permitir que sus partidarios le atribuyeran el descubrimiento de la conserva-

ción de la energía. Trató con verdadero desprecio la obra de sus predecesores; pero, más tarde, reconoció el error de su actitud y proclamó en diversas oportunidades, los méritos de su compatriota MAYER, contra quien había dirigido anteriormente acerbas críticas.

Es indiscutible, por otra parte, que HELMHOLTZ llegó al principio de la conservación de la energía independientemente tanto de los trabajos de MAYER como de los de JOULE y COLDING, partiendo del postulado de la imposibilidad del movimiento perpetuo combinado con el enunciado de la tercera ley de movimiento de NEWTON, enunciado al cual hicimos referencia anteriormente.

HELMHOLTZ expuso por primera vez sus ideas en una conferencia que pronunció en la Sociedad de Física de Berlín, el 23 de julio de 1847, y POGGENDORFF rehusó publicar el manuscrito de esta conferencia —como también había rehusado anteriormente el trabajo de MAYER— considerando más conveniente hacer conocer en los *Anales* que dirigía, trabajos experimentales y no teóricos.

Sólo nos resta comparar ahora los derechos de COLDING, JOULE y MAYER. Y —como es lógico que ocurra en el proceso de eliminación que hemos seguido— llegamos así a la última y más ardua etapa de nuestro juicio. Es tan ardua, que algunos autores, como BRUNHES, se rehusan a resolverla y, dividiendo honores, llaman al 1.er principio de la termodinámica: «principio MAYER-COLDING-JOULE».

Sin dejar de reconocer la prudencia de esta solución, tratemos de ser menos «salomónicos» y esforcémonos en descubrir algunas distinciones entre los grandes méritos de esos tres sabios que llegaron independientemente unos de otros, a conclusiones parecidas, casi simultáneamente.

El ingeniero dinamarqués COLDING (1815-1888) presentó, en 1842, a la Academia Danesa, notas que ésta publicó sólo en 1851, en las cuales el autor estudiaba, bajo un doble aspecto científico y filosófico, la conservación de la energía y describía sus experimentos de determinación del equivalente mecánico del calor efectuados con

aparatos parecidos a los que usara COULOMB en sus estudios del frotamiento. COLDING aseguraba, además, que si su principio no fuera siempre exacto, sería posible realizar el movimiento perpetuo.

El eminente físico inglés JOULE (1818-1889) llevó a cabo sus numerosos y bien conocidos experimentos de determinación del equivalente mecánico por métodos distintos, de 1840 a 1843, publicando por primera vez los resultados obtenidos en la última de estas dos fechas.

JOULE reconocía que MAYER lo había precedido, pero criticaba la carencia de pruebas experimentales de las hipótesis del sabio alemán, al que acusaba de «*haberse apresurado con el único fin de asegurarse la prioridad de las ideas*», mientras que él, JOULE, no quería publicar sino «*teorías establecidas por experiencias elegidas, por estar convencido de la exactitud de la afirmación de* J. HERSCHEL, *de que las generalizaciones rigurosas son la plaga de la ciencia*».

MAYER descubrió el principio de la conservación en 1840; apreció de inmediato su trascendencia y dedicó todos sus esfuerzos al bosquejo —tal vez presuroso e imperfecto— de su amplia visión. Publicó así, en 1842, su primera Memoria.

Ahora bien, TAIT consideró que los verdaderos fundadores de la Termodinámica eran los experimentadores COLDING y JOULE, mientras que TYNDALL, que sostuvo una larga discusión con TAIT, reconocía ampliamente los méritos de COLDING y JOULE, pero proclamaba la gloria superior de MAYER, afirmando que: «*Él fué el primero que vió surgir en su espíritu la idea de equivalencia entre el calor y la energía mecánica, y la analogía íntima y rigurosa entre el calor y el trabajo. Él fué quien nos dió la expresión de equivalente mecánico del calor, y él quien siguió este nuevo principio hasta sus consecuencias más atrevidas*».

El mismo TAIT, que tanto protestó por «*la manera exagerada con que se colmó de gloria*» a MAYER, reconocía que su mérito indiscutible consistía en «*haber dado una teoría verdadera por medio de un razonamiento falso*

y haber desarrollado esa teoría en sus aplicaciones por medio de razonamientos rigurosos».

Pero TYNDALL agrega aun a sus afirmaciones, esta exhortación que debe ser atendida: «*El futuro historiador de la ciencia no establecerá —así lo espero— antagonismo entre esos dos hombres* (MAYER y JOULE), *pues tienen adquirida una reputación que no se extinguirá en mucho tiempo, tanta es la gloria que han conquistado, no sólo por haber establecido la teoría mecánica del calor, sino por haber abierto el camino a una más exacta apreciación de las energías generales del universo».*

OSTWALD defiende en forma casi exclusiva, a su compatriota MAYER, apoyándose en la prioridad de su publicación y en su claro concepto de la importancia de la idea a la cual consagró por entero su dolorosa vida.

ARIÈS, en su estudio de la obra de SADI CARNOT, critica en OSTWALD un exagerado desprecio por los predecesores de MAYER, pero encuentra una disculpa para este exclusivismo: es que MAYER fué el único de esos fundadores de la termodinámica que demostraba su oposición al concepto «mecanista» del calor, para crear el concepto nuevo de energía, objeto real como la materia, pero que se distingue de ella por carecer de las condiciones de ponderabilidad y de impenetrabilidad.

La mayor parte de los autores franceses reconocen, como ARIÈS o POINCARÉ y PICARD, los derechos de MAYER como fundador del 1er. principio, y unen el nombre de MAYER al del gran sabio francés CARNOT, fundador del 2º principio.

Cada vez son menos numerosos los historiadores que siguen empeñándose —como aun lo hacen BORDEAUX (1) y WESTAWAY (2)— en proseguir la injusta campaña de

(1) *Histoire des Sciences au XIX.e Siècle*, A. BORDEAUX. (Béranger, París, 1920).

(2) Debe observarse que F. WESTAWAY en *Endless Quest* afirma incidentalmente que MAYER precedió a JOULE (pág. 354), pero en el capítulo especial sobre Termodinámica (págs. 433-440), no cita siquiera el nombre de MAYER y atribuye todo el mérito del descubrimiento de la «doctrina de la conservación de la energía» a JOULE.

silencio o de desprecio que tanto hizo sufrir al desventurado genio alemán.

GEORGE SARTON, el gran historiador de la ciencia (de nacionalidad belga, aunque radicado desde hace más de un cuarto de siglo en Norte América), amplía el juicio de TYNDALL cuando dice: «*Los nombres de* MAYER *y* JOULE *deben permanecer unidos en nuestros corazones agradecidos. No es posible comparar cuantitativamente dos hombres tan esencialmente diferentes. Las vistas de* MAYER *eran vagas, pero amplias, y fué el primero*».

«JOULE *llegó a la misma conclusión general, un poco más tarde, por un camino completamente distinto. Una cosa puede ser dicha a favor de* JOULE: *el trabajo de* MAYER *en sí era insuficiente y no podía subsistir sin la comprobación experimental que* JOULE *le dió, mientras que la obra de* JOULE *es independiente y no necesita sostén exterior.* JOULE *construyó el firme cimiento mientras* MAYER *construyó en la arena; sin embargo queda el hecho de que* MAYER *vió la verdad fundamental y sus consecuencias antes que* JOULE *y más ampliamente que él.*»

Agreguemos las palabras de MACH:

«MAYER *es el filósofo de la ciencia del calor y de la energía;* JOULE, *aunque también llegó al principio de la energía por la vía filosófica, fundó su teoría experimental; y* HELMHOLTZ *estableció la teoría desde el punto de vista físico.*»

Repitamos, pues, con veneración, la lista de los sabios que colaboraron al hermoso descubrimiento y afianzamiento del gran principio natural de la conservación de la energía, pero adoptemos ahora no «el orden de presentación en escena», sino el orden que sus méritos y sus derechos nos imponen: MAYER, JOULE, CARNOT, COLDING, MOHR, SEGUIN, GROVE, y en categorías aparte, por un lado: FARADAY y DAVY y RUMFORD, por el otro: HELMHOLTZ.

Detengámonos ahora en el recuerdo de la obra y de la vida de MAYER, a quien acabamos de reconocer ampliamente el título de «fundador del Primer Principio de la Termodinámica».

3

UNA VIDA: JULIUS ROBERTUS MAYER

Era en 1840... El «Java», velero holandés que navegaba rumbo a las Antillas, llevaba a su bordo, como médico, al joven alemán doctor JULIUS ROBERTUS MAYER.

Este flamante profesional había nacido en 1814, en Heilbronn, pequeña ciudad de Wurtemburgo, donde su monótona infancia transcurrió entre la farmacia de su padre y el colegio, en el cual jamás logró triunfar.

Su adolescencia, tan deslucida como su infancia, tuvo por escenario el Seminario de Schoenthal, antigua y austera abadía del siglo XII que eleva aun en nuestros días, sus torres solitarias en medio de la campiña wurtemburguesa.

De allí, MAYER pasó a la célebre y medioeval universidad de Tubinga, y de su modesta actuación en ella, sólo merece recordarse que, a raíz de una suspensión por una falta al reglamento, MAYER pudo escapar por unos meses a la opresiva monotonía provinciana y a la lenta tristeza del ambiente medioeval, para convivir el moderno dinamismo de las urbes en Munich y en Viena.

Esta había sido su vida: Heilbronn.. Schoenthal... Tubinga... tristeza de viejas casas, de abadías y castillos, quietud del viejo Wurtemberg... luego: Munich, Viena... la obtención del título de médico, en 1838... unos meses en París... y ahora: el mar, el cielo, todo el mundo, aire virgen que inunda los pulmones, emancipación que ilumina el espíritu.

Sólo había 28 pasajeros a bordo; todos gozaban de muy buena salud, y el médico podía dedicar todo su tiempo a la meditación.

Un viejo marinero, el timonel del «Java», dijo al descuido: «El mar siempre es más caliente después de una violenta tormenta...». ¿Ocultaban esas palabras el embrión de la energética? ¿Estableciόse en la subconciencia

de MAYER un enlace entre ese movimiento y ese calor? Cual fermento de pausado cultivo, ¿prepararon esas palabras la próxima, y a toda luz repentina, eclosión de la idea consciente?

MAYER nos señala como otro factor importante en este misterioso proceso del nacimiento de su idea renovadora, otro hecho casual: Durante la estadía en el puerto javanés de Surabaya, observó que la sangre que brotaba al efectuar una sangría, era tan clara, que temió haber seccionado una arteria. «La sangre venosa siempre es más clara en los países cálidos», explicáronle sus colegas de Java.

Agregóse esta observación como nuevo germen en el espíritu de MAYER, que vislumbró posibles relaciones entre la alimentación, el calor y el trabajo del cuerpo. Y surgió entonces, si no aun la convicción, por lo menos la definida aspiración científica cuyo cumplimiento debía ser la misión de su vida y su eterno título de gloria: el esclarecimiento de los lazos secretos entre el calor y el trabajo.

Después de un año —exactamente un año— de emancipación, MAYER volvió al hermético encierro de su ciudad natal, pero traía, con el recuerdo de soles ardientes y de vastos horizontes, una idea luminosa y vastos anhelos.

Pese a su fe, dedicóse entonces a someter su idea a una severa autocrítica y realizó con extraordinaria energía la ímproba labor de buscar aquello que se desea no encontrar jamás: la sinrazón de la propia convicción. Su fe fué fortalecida por este estudio, pues no halló en la ciencia oposición alguna a su hipótesis.

Concretó entonces sus convicciones en un artículo que llamó «La Determinación Cuantitativa y Cualicativa de las Fuerzas» y lo envió para su publicación, al director de los *Anales de Física*, el célebre POGGENDORFF.

POGGENDORFF no hizo lugar al pedido ni contestó siquiera al desconocido firmante «JULIUS ROBERTUS MAYER, médico de Heilbronn».

OSTWALD y GUILLEMINOT disculpan a POGGENDORFF por haber despreciado ese trabajo, pues MAYER cometía en

él graves errores matemáticos, confundía «trabajo» con «cantidad de movimiento» e ignoraba el triunfo del criterio de LEIBNIZ sobre el de DESCARTES, el triunfo de mv^2. sobre mv.

Que me sea perdonada la irreverencia de no admitir la argumentación en que fundan su opinión OSTWALD y GUILLEMINOT. Admiro demasiado a POGGENDORFF para poderlo hacer, y prefiero creer que este gran maestro de la historia de la física, vislumbró el fulgor de la idea nueva y fecunda debajo de su expresión inexacta, pero que postergó su mejor estudio, pues, en aquel año de 1841, POGGENDORFF realizaba sus propias investigaciones sobre la polarización eléctrica, precursoras inmediatas de la célebre obra de LENZ. Por otra parte, no sólo podemos libremente proponer esta interpretación histórica más favorable a POGGENDORFF, sino que podemos fundarla en el hecho de que, después de la muerte de este sabio historiador de la física, se encontró, entre otras anotaciones científicas cuidadosamente conservadas, el artículo de MAYER.

Debe agregarse, por añadidura, que POGGENDORFF se resistía siempre a dar acogida en los *Anales de Física*, a trabajos excesivamente teóricos «a fortiori» con tendencia filosófica, prefiriendo a ellos los trabajos experimentales, como tuvimos oportunidad de señalarlo al recordar que el gran historiador de la Física también rechazó el trabajo de HELMHOLTZ, en 1847.

La aparente indiferencia de POGGENDORFF y la falta de todo apoyo o aliciente, fuera de la amistad del matemático BAUER, no desanimaron al médico de Heilbronn, que amplió y profundizó su idea inicial, corrigió sus errores y escribió su célebre Memoria de 1842, *Observaciones sobre las Fuerzas de la Naturaleza Inorgánica*, que el ilustre químico LIEBIG publicó gustoso en los *Anales de Química y Farmacia* (Vol. 42, pág. 233. Mayo 1842).

Allí, MAYER expuso con claridad el principio de la conservación de la energía, su concepto concreto de la naturaleza de las fuerzas y la necesidad de establecer experimentalmente el equivalente mecánico del calor.

MAYER inicia este breve e importante trabajo invocando el principio de igualdad entre la causa y el efecto («Causa aequat effectum»), para deducir de allí los conceptos de «indestructibilidad» (cuantitativa) y de «convertibilidad» (cualitativa), aplicables por igual a ambos tipos de causa existentes en la naturaleza: la materia y las fuerzas.

Después de mostrar cómo un movimiento da lugar a otro movimiento, se pregunta qué forma puede adquirir una fuerza cuando no da lugar a movimiento, ya que es sabido que no puede ser destruída. Sólo la experiencia puede contestar a esta pregunta, agrega MAYER, y nos da numerosos ejemplos de aparición de calor, siempre que haya gasto de movimiento. No cree posible suponer que el efecto de la detención de un movimiento pueda ser una alteración del estado de agregación del cuerpo que sufre esa modificación de movimiento.

Tampoco considera posible atribuir el calor a la disminución de volumen del cuerpo que sufre presión o frotamiento, y dice: «*Es bien sabido que dos pedazos de hielo pueden ser fundidos frotándolos en el vacío, pero, ¡probad convertir hielo en agua por presión, por enorme que sea ésta!*»

TAIT se regocija ante «*la inexactitud absoluta*» de esta afirmación de MAYER. En efecto, JAMES THOMSON (1849), CLAUSIUS y MOUSSON (1858), demostraron que la presión provoca la fusión del hielo o sea, provoca el descenso de su punto de fusión (más o menos 0,0075° C. por atmósfera). Pero, a pesar de este error, el argumento de MAYER subsiste, ya que en todos los cuerpos que al fundirse se dilatan, el punto de fusión se eleva cuando aumenta la presión, como lo demostraron las experiencias de BUNSEN (1850), y de HOPKINS (1874)) (1).

Prosiguiendo la lectura del trabajo de MAYER, éste nos hace ver que, sacudiendo agua en un frasco, llegó a elevar su temperatura de 12° a 13° C. y que el agua había aumentado de volumen. Y Pregunta: ¿De dónde viene ese calor

(1) CHWOLSON. Tomo VII, págs. 212 y siguientes.

que puede ser obtenido tantas veces como se quiera? «*La hipótesis vibratoria del calor*», observa «*es un acercamiento hacia la doctrina que considera el calor como efecto del movimiento, pero no favorece la admisión de su relación causal en su completa generalidad*».

Luego MAYER explica así la relación entre el calor y el movimiento: el acercamiento de moléculas por compresión produce calor, un cuerpo que cae es un fenómeno semejante, y el calor producido debe ser proporcional a la magnitud del peso y a su distancia con el suelo. «*Pero*», dice, «*estoy tentado de inferir que, antes de volverse calor, el movimiento —simple o vibratorio, como en el caso de la luz y del calor radiante, etc. . . .— debe dejar de existir como movimiento*».

Y TAIT vuelve a escandalizarse ante esta afirmación que parece estar reñida por completo con la teoría del calor-movimiento, y, aludiendo claramente a su compatriota TYNDALL, dice: «*Este hecho puede dar una idea muy curiosa acerca de los que, sin dejar de hablar continuamente del calor como un modo de movimiento, atribuyen a* MAYER *el título de fundador de la teoría moderna del calor*».

Más lejos, MAYER se pregunta cuál es la cantidad de calor que corresponde a una cantidad determinada de movimiento o de fuerza de caída, o sea, «*a qué altura debe elevarse un peso determinado para que su fuerza de caída pueda ser equivalente a la elevación de la temperatura de un peso igual de agua de 0° a 1° C.*».

Y prosigue: «*Aplicando los principios que han sido emitidos sobre las relaciones existentes entre la temperatura y el volumen de los gases, encontramos que el descenso de una columna de mercurio que comprime un gas es equivalente a la cantidad de calor puesto en libertad por la compresión, y de allí se deduce que, si la proporción entre la capacidad del calor a presión constante y su capacidad a volumen constante es igual a 1,421, la elevación de la temperatura de un peso dado de agua de 0° a 1° C., corresponde a la caída de un peso igual de una altura de unos 365 metros*».

Y de allí deduce el sabio alemán que en la máquina de vapor sólo una pequeña parte de calor es realmente transformada en movimiento, y considera este hecho como una justificación del deseo de reemplazar este método de producción de movimiento por algo más eficaz: la transformación de la electricidad en movimiento.

¡1842! Fué este año un breve paréntesis de felicidad en la triste vida de MAYER. Su triunfo —sin mayor resonancia, por otra parte—, coincidió con su casamiento y con su nombramiento como cirujano inspector de la provincia.

Prosiguió sus estudios con fe creciente...

En 1845, publicó un memorable estudio sobre *El movimiento Orgánico y la Nutrición,* en que no sólo se encuentra una aplicación biológica de su teoría, sino la explicación de su afirmación anterior acerca de la avaluación del equivalente mecánico del calor en 365, por el procedimiento de la diferencia de capacidad calorífica de un gas a volumen constante y a tensión constante.

MAYER razona de la siguiente manera: si, en un recipiente cilíndrico de 1 dm^2 de sección, encerramos un litro de aire a 0° C. de temperatura y 760 mm. de presión, colocando un émbolo que cierra herméticamente el recipiente a 1 dm. de distancia del fondo, y si elevamos luego la temperatura del aire a 1° C., se levantará el émbolo de $\frac{1}{273}$ dm. ($\frac{1}{2730}$ m.) para conservar la misma tensión interior. El trabajo realizado habrá vencido, pues, la presión del aire que es de 103.3 kg. por dm^2., y, por consiguiente, será igual a:

$$103.3 \times \frac{1}{2730} = 0'037849 \text{ kgm.}$$

Continuemos el razonamiento de MAYER, pero sustituyendo a los valores equivocados que utilizó como antecedentes de sus cálculos, valores actualmente admitidos: A volumen constante, o sea sin moverse el émbolo, se necesita utilizar 0,000218 calorías para elevar la temperatura de 1 lt. de aire de 0° a 1° C. mientras que, manteniéndose

la tensión constante, o sea dejando el aire dilatarse de $\frac{1}{273}$ de su volumen, se necesita 0,000307 calorías, es decir, 0,000089 calorías más que antes. Esta diferencia corresponde al trabajo del movimiento del émbolo, cuyo valor acabamos de avaluar.

Por consiguiente:

0,000 089 calorías equivalen a: 0,037 849 kgm.
y: 1 caloría equivale a: 425,3 kgm.

Es decir que agua que cae de 425,3 mts. de altura eleva su temperatura en 1° C.

Pero los datos experimentales sobre los cuales se basaba MAYER para desarrollar este razonamiento, eran inexactos y, por este motivo, llegó al resultado equivocado de 365.

En cuanto a los elementos teóricos y experimentales utilizados por MAYER y relacionados con la capacidad calorífica del aire a volumen constante y a tensión constante, debemos buscar su origen en la obra de GAY-LUSSAC y especialmente en sus experiencias de 1807 con las cuales estableció que un gas que se expande en el vacío, no provoca ningún fenómeno calorífico. JOULE no tenía motivo, pues, para acusar a MAYER de haberle usurpado los frutos de su descubrimiento de la independencia entre la presión y el calor específico del aire.

En 1848, MAYER publicó la *Contribución a la Dinámica del Cielo*, aplicación cosmogónica de su teoría en la cual emitió la hipótesis de que el calor del sol proviene del choque de los meteoros, hipótesis que fué rechazada por HELMHOLTZ.

En ese año de 1848, un hermano de MAYER intervino activamente en un movimiento revolucionario, y ROBERTO mismo estuvo a punto de ser fusilado en el momento en que salía en busca de su hermano.

En 1849, MAYER publicó un artículo acerca de sus descubrimientos en el *Allgemeine Zeitung*. El doctor OTTO SEYFFER le contestó, discutiendo los méritos de MAYER, y cuando éste quiso, a su vez, demostrar la veracidad de

sus afirmaciones, la redacción del diario rehusó publicar su contestación.

Y llegó el desastre.

En 1850, a los 36 años de edad, MAYER perdió la razón. Pasó un año de absoluta y dolorosa reclusión durante la cual médicos incompetentes confundieron su estado de depresión nerviosa con una locura violenta, atribuyeron sus ideales científicos a una manía da grandeza y sometieron al sabio a humillantes violencias.

Pese a los médicos volvió a la razón; y la vida de MAYER se prolongó veinticuatro años más, repartida en períodos de descanso y otros de relativa actividad. Viajó por Suiza... volvió a Heilbronn...

En 1858, asistió al Congreso de Ciencias Naturales en Karlsruhe, y, en 1869, intervino en el Congreso de Insbruck. A raíz de esta última intervención, un diario criticó a los organizadores por tolerar la presencia de un demente en un congreso científico, y MAYER, hondamente impresionado por este ataque brutal, fué víctima de una nueva depresión nerviosa.

Entre ese sinnúmero de desgracias, se destacan algunas satisfacciones: MAYER encontró nobles y espontáneos defensores en el físico TYNDALL, los filósofos DUHRING y POPPER y el químico SCHOENBEIN.

En 1863 TYNDALL publicó su obra *El Calor. — Modo de Movimiento* y en ese libro recordó elogiosamente el olvidado trabajo de MAYER, y fué por este recuerdo por lo que Alemania ya no se sorprendió tanto cuando DUHRING, en 1878, habló de «ROBERTO MAYER, *el* GALILEO *del Siglo* XIX».

MAYER fué nombrado miembro corresponsal de la Sociedad de Ciencias Naturales de Basilea, miembro de la Academia de Munich, y doctor «honoris causam» de la Universidad de Tubinga. Francia le otorgó el premio Poncelet en 1870 y le invitó para recibirlo a pesar de haberse declarado la guerra franco-prusiana; la Sociedad Real de Londres le concedió el premio Copley...

Pero, mientras tanto, sus mismos allegados le negaban su admiración y le reprochaban su fracaso material, y el

mundo científico atendía, y hasta aprobaba, los ataques de SEYFFER, HELMHOLTZ, JOULE, W. THOMSON (Kelvin), TAIT y tantos otros que, con respeto y buena fe los unos y con apasionamiento y prejuicio los otros, parecían ensañarse en arrancar a MAYER su tan menguada porción de gloria, demostrándole toda la verdad del adagio latino: «Quam difficilis gloriae custodia est!».

En 1876, MAYER publicó su último trabajo, *Sobre Liberación.*

El 20 de marzo de 1878, dejó de existir.

4

EL SEGUNDO PRINCIPIO

Sadi Carnot — Clausius

Hemos tratado de recordar aquí —aunque con excesiva rapidez— aquel capítulo de la historia de la ciencia que podría llamarse «El nacimiento de la Termodinámica». Si el espacio disponible fuera mayor, desarrollaríamos el capítulo siguiente cuyo título podría ser: «El florecimiento de la Termodinámica».

Sólo aludiremos a su importancia.

En ese fin de la primera mitad del siglo XIX, el principio de la conservación de la energía había llegado a su madurez. Pero este concepto de elaboración secular y repentino florecimiento, permanecía desligado en absoluto del descubrimiento que hiciera en 1824, el joven ingeniero francés SADI CARNOT en su empeño en estudiar eficazmente y en forma técnica «*el mayor rendimiento económico de las máquinas de fuego.*» Este descubrimiento, cuyas admirables consecuencias no conoció, ni siquiera pudo prever SADI CARNOT, debido a su tan prematura muerte, él lo realizó espontáneamente, sin vacilaciones, sin precursores siquiera.

Expresado en su pequeñísimo opúsculo titulado *Reflexiones sobre la Potencia Motriz del Fuego* queda condensado en la afirmación de que «*el calor no puede producir trabajo sin el empleo de dos fuentes térmicas con temperaturas distintas*» y —fiel a la terminología imperante, correspondiente a la doctrina del «calórico»— añadía que «*semejante al agua, el calor sólo produce trabajo cuando cae de un cierto nivel a otro inferior*». Agregaba además que por perfecta que fuese una máquina térmica su coeficiente económico no podría jamás ser mayor que el de una máquina perfecta de ciclo reversible constituído por dos curvas isotérmicas y dos adiabáticas (ciclo de CARNOT), y que ese coeficiente es independiente en absoluto de la sustancia que recorre el ciclo.

A mediados del siglo XIX, este pequeño opúsculo de CARNOT, modesto continente de ideas de infinita fecundidad, estaba completamente olvidado. Fué así que W. THOMSON (futuro Lord Kelvin), que tuvo conocimiento de la obra y la buscara afanosamente, no logró encontrarla en las librerías de París, en el año 1845; y CLAUSIUS nos dice: «*Yo no he podido conseguir esta obra y no la conozco sino por los trabajos de* CLAPEYRON *y* THOMSON...»

Sin embargo, CLAPEYRON (París 1799-1864) había hecho el estudio y la ampliación matemática del trabajo de CARNOT, en 1834, expresando la función general de temperatura llamada «función CARNOT»; pero CLAPEYRON mismo repetía «el error de CARNOT» pues él también hablaba el lenguaje del «calórico».

Fué W. THOMSON quien, en 1848, ya en posesión del opúsculo de CARNOT, llamó la atención de los sabios sobre las posibles proyecciones de su descubrimiento y sobre la importancia inmediata de la función de CARNOT, aunque el gran sabio inglés consideraba muy difícil poder establecer concordancia entre esos descubrimientos, en los cuales sólo se contemplaba el transporte de un calor cuantitativamente invariable (pues CARNOT suponía que el calor pasaba íntegramente de la fuente caliente a la fuente fría), con el principio de MAYER, que establecía que el trabajo se produce a expensas del calor.

Y, sin embargo, W. THOMSON descubría perfectamente, detrás de la expresión defectuosa de CARNOT, el enorme alcance del concepto de un sentido natural de las transformaciones del sentido irreversible universal que había de surgir, amplia y fecundamente, si se lograra fundir entre sí las ideas de CARNOT y de MAYER. Vislumbraba allí el grande segundo principio de la Termodinámica, de característica cualitativa expresada por el único sentido posible en que pueden efectuarse las transformaciones, mientras que el primer principio, con su ley universal de conservación de energía, era típicamente cuantitativo.

Veía THOMSON que, mientras el primer principio había presentado la tranquilizadora certeza de una constante total que permitía regular y verificar los movimientos de fondos dentro de la seguridad del balance general de los intercambios universales, el segundo principio presentaba el angustioso enigma de un rumbo inexorable del universo... ¿hacia dónde?

Frente a esa visión, THOMSON exclamaba: «*En todo el dominio de la ciencia, no hay nada más grande que la obra de* SADI CARNOT...».

Sin embargo, THOMSON, consciente del valor tanto del primer principio como del segundo principio de la Termodinámica, no tuvo la osadía de someter el concepto de CARNOT al concepto de MAYER «*por miedo a innumerables dificultades*».

CLAUSIUS entonces respondió a THOMSON: «*Yo no considero tan grandes esas dificultades... porque si es cierto que es preciso introducir algunas variaciones en el modo de exposición usado hasta el presente, no puedo encontrar nada en esas alteraciones que esté en contradicción con los hechos demostrados... Un examen profundo demuestra que no es el principio fundamental de* CARNOT *el que está en oposición con la nueva manera de considerar las cosas sino el principio que añadió, según el cual no se perdería calor, porque cuando hay producción de trabajo, puede suceder muy bien que cierta cantidad de calor se consuma y que otra cantidad sea transportada de un cuerpo caliente a un cuerpo frío, y estas dos cantidades de calor*

puedan tener una relación determinada con la cantidad de trabajo producido...».

He aquí pues a CLAUSIUS quien, en 1850, (tenía a la sazón 28 años de edad), publica en los *Anales de Física* —con pleno consentimiento de POGGENDORFF, esta vez— el trabajo con el cual se reunían las ideas de MAYER y de CARNOT, ideas que *«no sólo pueden existir juntas, sino que además se prestan mutuo apoyo...»*

CLAUSIUS estableció su célebre postulado: *«El calor no puede de por sí mismo transportarse de un cuerpo frío a un cuerpo caliente... Si parece existir semejante transporte inverso, debe existir otro de caliente a frío que lo anula».*

Este postulado fué objeto de numerosas críticas, y se empeñaron muchos físicos en demostrar teórica y prácticamente su inexactitud. Fué en vano...

Debe destacarse que, en el momento en que aun los sabios franceses, y entre ellos el célebre BERTRAND, atribuían a esta intervención de CLAUSIUS influencia primordial sobre la base misma del segundo principio, el sabio alemán tuvo el hermoso gesto de exigir que se conservara al genial descubrimiento el nombre del malogrado CARNOT.

5

LA MISTERIOSA ENTROPÍA

Desarrollando su postulado, CLAUSIUS ratificó la exactitud del «teorema de CARNOT» y estableció que «La relación entre el calor gastado útilmente y el calor gastado total, es independiente de la naturaleza del cuerpo y es igual al cociente de la diferencia de las temperaturas extremas por la temperatura absoluta más elevada.»

$$R = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T - T'}{T}$$

Ya dijimos que el segundo principio, tal como lo descubriera CARNOT y lo concibiera filosóficamente THOMSON, señala un sentido, un rumbo que, contrariamente a la invariante especificada por el primer principio, y que es la energía, supone la variación continua de una entidad. Esta entidad, CLAUSIUS la presentó en 1854 y la llamó: la entropía.

Este nuevo personaje, aparecido repentinamente en el escenario de la ciencia, fué acogido con sorpresa, recelo o estupor.

LUCIANO POINCARÉ dijo:

«*Muchos físicos vacilan y dudan en utilizarla, viendo sólo en ella una función puramente matemática, sin ningún sentido físico determinado...*».

Pero agrega luego:

«*La verdadera razón que hace la entropía algo misteriosa es que esa magnitud no hiere directamente a ninguno de nuestros sentidos; empero posee el verdadero carácter de las magnitudes físicas concretas, puesto que, al menos en principio, es perfectamente mensurable.*»

BRUNHES tildaba la entropía de «*concepto prodigiosamente abstracto*» y lo consideraba perjudicial a las explicaciones acerca de la energía calorífica porque «*siempre se podrá contestar que no sabemos lo que es la entropía*».

LE DANTEC, el eminente biólogo y físico francés, dijo: «*Cada vez que, en mis estudios de biología general, traté de utilizar los resultados de la Termodinámica, me molestó la existencia de esa noción matemática no traducida en lenguaje vulgar...*»

GUILLEMINOT, el autor de la obra de amplia divulgación *Los Nuevos Horizontes de la Ciencia*, afirmaba que «*no hay lector interesado en la vulgarización científica en quien esta palabra entropía no despierte un sentimiento de malestar.*»

De acuerdo con el teorema de CARNOT interpretado por CLAUSIUS, podemos afirmar que en una máquina ideal:

$$Eu = Q \frac{T - T'}{T}$$

$$\text{Energía utilizable} = \text{cantidad de calor} \times \frac{\text{temp. abs. máx.} - \text{temp. abs. mín.}}{\text{temp. máx.}}$$

o sea:

$$Eu = (T - T') \frac{Q}{T}$$

en que $(T - T')$, diferencia de temperatura absoluta, sería la «*caída de calórico*», para hablar como lo hiciera CARNOT, y $\frac{Q}{T}$, relación entre energía térmica y temperatura absoluta máxima, es el importante factor que CLAUSIUS llamó «*entropía*», que RANKINE llamaba «*función termodinámica*» y que ZENNER denominaba «*el peso del calor*».

Ahora bien, lo que CLAUSIUS demostró es que, en una transformación reversible, la entropía permanecerá igual, mientras que, en todos los fenómenos reales irreversibles, la entropía aumenta. Este aumento permanente de la entropía, vuelve a la energía, cuya totalidad cuantitativa es constante, variable en cualidad, pues se hace cada vez menos utilizable.

La cantidad se mantiene, pero la cualidad se desperdicia y, extendiendo estas consideraciones de los fenómenos usuales a todo el universo, CLAUSIUS deducía de allí que el universo tiene un sentido fijo, una evolución determinada, una marcha hacia un fin...

Reconociendo ese sentido que marca la entropía, EDDINGTON la considera como el punto de referencia o la señal con que la Naturaleza separa el pasado del porvenir.

De ese concepto de la entropía y particularmente de la tendencia a la repartición uniforme de la temperatura, THOMSON concibió la «*disipación*» de la energía,

que TAIT (1870) bautizó «*degradación de la energía*», cuyo postulado es: «La energía repartida en el mundo tiende a degradarse, es decir, a transformarse en energía calorífica uniformemente repartida...»

El principio de CARNOT-CLAUSIUS se volvía así el «principio de la degradación de la energía»; no indica una igualdad de permanencia, sino una desigualdad y una tendencia.

Este sería el rumbo irreversible del destino del Universo: las distintas formas de energía de alta frecuencia se transformarían en energía de baja frecuencia, el calor, que, a su vez, por irradiación y conductibilidad, llegara al paralizante equilibrio de temperatura. Todo habrá terminado en el Universo...

He aquí pues, cómo, al decir de LE DANTEC, «*del crecimiento incesante de este "no sé qué" ciertos físicos y filósofos sacan conclusiones relativas al fin del mundo*». Ya no podía subsistir el concepto secular y apriorístico de que en la naturaleza todo tiene un curso cíclico con que el estado de las cosas se restablece eternamente. El primer principio ratificaba este concepto; el segundo lo destruye.

Frente a esta conclusión de la marcha del universo en sentido determinado y hacia su fin, a la cual la ciencia llega tal vez por extralimitada osadía, surgen normalmente dos actividades opuestas y ambas apriorísticas y hasta temperamentales. La primera, adoptada por sabios de tanto valer como EDDINGTON, es de perfecta conformidad; la segunda es de rechazo liso y llano ante la suposición del fin del Universo. Para satisfacer esta segunda actitud y rechazar la fatal conclusión del segundo principio de la termodinámica, se pueden imaginar hipótesis distintas como la de la «reconcentración de energía» de RANKINE.

BOLTZMANN, por su lado, resolvió la angustiosa dificultad dando al segundo principio de la Termodinámica (contrariamente al primero que es absoluto) un carácter estadístico, que no permite extenderlo fuera de la escala media de los fenómenos macroscópicos de apreciación humana, en los cuales intervienen conjuntos de moléculas

en números muy elevados, pero no comparables a las inmensas multiplicidades de orden universal.

El segundo principio de la Termodinámica entra así, con BOLTZMANN, en la «Mecánica Estadística» que éste fundara como desarrollo de la teoría cinética de los gases, cuya ley fundamental de distribución de las velocidades moleculares fuera dada por MAXWELL y está íntimamente ligada con el progreso del atomismo. Más tarde, con el triunfo de la teoría cuántica, esta «estadística MAXWELL-BOLTZMANN» dió lugar a las estadísticas de FERMI y BOSE-EINSTEIN.

Recordemos aquí la célebre imagen del «demonio de MAXWELL».

Un diablito travieso se coloca en una puertita abierta en el tabique separador de dos recipientes que contienen un gas a temperatura uniforme, y se entretiene, con extraordinaria destreza, en dejar pasar hacia un lado las moléculas veloces y hacia el otro las más lentas. De esta manera, este insufrible diablillo habrá provocado desigualdades de temperatura sin ningún trabajo exterior, con el solo fin avieso de contradecir el principio de CARNOT, del cual MAXWELL destacaba así el carácter de simple probabilidad y no de ley absoluta.

Sin duda, puede decirse, como JEANS, que «*nadie le manda al demonio microscópico hacerle trampas a las leyes de la naturaleza*». Pero he aquí que la naturaleza misma dió la razón a MAXWELL y a su demonio, pues en el movimiento browniano, las pequeñas partículas en suspensión en un líquido vencen espontáneamente la gravedad, y adquieren esa energía potencial, de la energía calorífica (molecular) del medio, pese al equilibrio térmico y contraviniendo pues, tan atrevidamente como el demonio de MAXWELL, al principio de CARNOT, que, a todas luces, sale de su jurisdicción normal al pretender entrometerse en el mundo microscópico intermolecular.

He aquí pues lo que BOLTZMANN recogió claramente: el segundo principio de la Termodinámica sólo es exacto en lo macroscópico, en magnitudes medias, porque corresponde a valores medios de mayor probabilidad. BOLTZ-

MANN estableció matemáticamente esa afirmación con la siguiente función:

$$S = K. \log. W$$

en que S es la entropía, K una constante y W la probabilidad o sea el número de estados más probables.

Si, como lo demuestra BOLTZMANN, la entropía sólo es una marcha hacia lo más probable, pueden además esperarse bruscos desvíos hacia lo menos probable. La probabilidad no puede ser asegurada todo a lo largo de tiempos fantásticamente inmensos. Dentro de esta inmensidad cabe la posibilidad de períodos de sentido dirigido hacia lo actualmente improbable.

El mismo carácter de probabilidad y de estadística que BOLTZMANN supo dar a la entropía, como dependiendo de la teoría cinética del calor, deja pues a la naturaleza un margen de libertad.

Dice JEANS: «*Si alguien afirmase que el universo se desplazara a un estado de entropía más baja que el estado actual, no podríamos demostrarle que estaba equivocado. Tendría derecho de sostener esa opinión, ya como especulación, ya como esperanza piadosa. Todo lo que podemos decirle es que las probabilidades en contra de la realización de su sueño se elevan a una potencia muy alta, de* $10.^{79}$». «*La Termodinámica*», agrega, «*acostumbra prescindir de esas probabilidades infinitesimales, esperanzas perdidas, y enuncia sus leyes como certezas*».

Abandonemos ahora estas especulaciones filosóficas acerca del fin del Universo, para detenernos en otras consecuencias del descubrimiento de los principios de la Termodinámica sobre la evolución de la ciencia a mediados del siglo XIX.

CAPÍTULO IX

LA ENERGÉTICA

1

MATERIA Y ENERGÍA

Física y Metafísica

Con el descubrimiento de MAYER de la transformación de una forma de energía en otra, cinética, calorífica, eléctrica, magnética o química... pudo nacer una nueva doctrina según la cual la materia se esfumaba, como noción superflua, y todos los fenómenos naturales se limitaban a transformaciones de energía. Esta doctrina era la Energética, que si bien ahora parece ya una creencia caduca y olvidada, un episodio pasajero en las relaciones entre ciencia y filosofía, fué, hace apenas medio siglo, una angustiosa y sensacional «cuestión científica».

Con ella, se proponía sustituir a la doctrina mecanista (1), que, desde hacía ya dos siglos, se empeñaba en

(1) Vacilo cada vez que se presenta la oportunidad, como en este caso, de emplear el adjetivo «mecanicista» o el sustantivo «mecanicismo» en lugar de los términos de «mecanista» y «mecanismo»; es que la voz «mecanicismo» me parece agresivamente despectiva. Tal vez pueda atribuir esta impresión a una analogía con las palabras francesas «romanticisme» y «romantisme» que significan, la primera: una sensiblería excesiva y algo ridícula, mientras la segunda se refiere al admirable movimiento espiritual cuyas obras literarias, científicas, artísticas o sociales glorifican la primera mitad del siglo XIX.

explicar todos los fenómenos naturales por medio de materia y movimientos, siguiendo las leyes de la mecánica clásica, y suponiendo que esas materias y esos movimientos fueran invisibles, intramoleculares y atómicos, cada vez que dejaran de ser apreciables por los sentidos, como en el caso del calor o de la electricidad.

De allí, se ve de inmediato surgir el antagonismo entre el «atomismo», esencialmente materialista y mecanista, y la Energética.

El segundo principio de la Termodinámica, principio de CARNOT-CLAUSIUS, con su declaración de irreversibilidad de los fenómenos naturales, presentaba también un mentís absoluto a la mecánica clásica, cuyas ecuaciones todopoderosas no podían explicar tal «sentido único en los fenómenos de la naturaleza».

No olvidemos que este movimiento energético nació a mediados del siglo XIX, época en que la filosofía y las ciencias físico-naturales vivían una de sus periódicas etapas de divorcio.

La *Historia de la Ciencia* nos muestra que, en el período griego, la filosofía estaba estrechamente ligada con la matemática, con evidente prioridad e influencia de ésta sobre aquélla. Desde los albores del período científico occidental, con COPÉRNICO, KEPLERO, GALILEO, NEWTON, HUYGHENS, se hizo evidente la separación entre la filosofía especulativa y la ciencia experimental y también la matemática, aunque ésta marcaba claramente su influencia sobre los conceptos filosóficos en DESCARTES o LEIBNIZ. En el siglo XIX, vimos a las ciencias biológicas ocupar preferentemente este puesto de influencia científica sobre la filosofía, hasta que sólo a fines del siglo y a principios del XX, la ciencia físico-matemática volvió a recuperar ese papel preponderante.

Encontramos en F. BACON, el desarrollo del materialismo realista de DEMÓCRITO en un método empírico inductivo de la ciencia física considerada como ciencia predominante. Y esta filosofía empírica la seguimos, en el siglo siguiente, en HOBBES, mecanicista que introduce ya la epistemología sensorial, y en GASSENDI que rechaza todo

concepto que no tenga representación sensorial y que encierra así, como filósofo-físico que era, toda especulación filosófica dentro del campo de la experiencia.

DESCARTES, al contrario, idealista y racionalista hace derivar nuestra imagen del mundo de verdades eternas, evidencias individuales, tomadas como base y desarrolladas por deducción y un método riguroso. DESCARTES sueña con una ciencia que sea una matemática universal. Debe expulsarse de la ciencia toda noción cualitativa y no dejar más que nociones cuantitativas (número, relaciones, proporciones). Por esto debe incluirse la Física dentro de la Matemática.

Dice DESCARTES acerca de la materia: «*Su naturaleza no consiste en dureza, pesantez, calor y otras cualidades de esta clase sino en extensión*», es decir, en cantidad. El movimiento esencialmente relativo es también sólo cantidad para DESCARTES (masa por velocidad, *m. v.*, cantidad de movimiento).

En esta filosofía deductiva cartesiana se destacaron MALEBRANCHE, LEIBNIZ y ESPINOZA, y se dió libre acción, con su mecanicismo, a una metafísica dialéctica.

Siempre en ese siglo de filosofía, que fué el XVIII, y de tan grande influencia cartesiana, LOCKE, atacando de frente el concepto de «ideas innatas» de DESCARTES, atribuía la base de nuestros conocimientos e ideas a los sentidos; y son esas nociones sensoriales, animadas por operaciones lógicas de generalización y abstracción, las que nos ponen en contacto con el mundo exterior, incognoscible. BERKELEY, en el siglo XVIII, hacía derivar del sensorialismo de LOCKE un idealismo que negaba la existencia misma de la materia independiente; lo único existente sería la percepción sensorial del hombre. Con LOCKE y BERKELEY pues quedaba completamente aniquilado el viejo materialismo realista de DEMÓCRITO. Y HUME, en la misma tendencia, preparó el positivismo del siglo XIX, con su perfecto empirismo que limitaba el conocimiento del mundo a ideas siempre representables, basadas en impresiones sensoriales que nos dan la noción de sustancia, pero no nos permiten buscar la esencia verdadera de las cosas. CONDI-

LLAC, de vigoroso pensamiento, redujo también todo el «yo» del hombre, al «conjunto de sensaciones que experimenta» y la idea no es para él, más que la fijación de una sensación. En él, como en HUME, reina una claridad absoluta de su actitud anti-metafísica y agnóstica en cuanto al mundo físico exterior.

Frente a este cierto escepticismo, nació en Francia la reacción realista y materialista, esencialmente física de MAUPERTUIS y de D'ALEMBERT, tan fecunda para la ciencia en sí. Ante ese antagonismo, surgió la doctrina epistemológica de KANT, que se mantiene igualmente alejada de DESCARTES y LEIBNIZ y su racionalismo metafísico, como de LOCKE y HUME y su sensorialismo agnóstico.

Para KANT la experiencia nos da la información necesaria acerca de las «cosas en sí» que existen realmente, pero cuya única intervención en nuestro conocimiento es estimular nuestros sentidos y permanecer inaccesibles.

Sobre estas impresiones, nuestra facultad de conocer, con su organización intelecto-sensorial, construye nuestra imagen del mundo. Para ello tiene como bases fundamentales de toda percepción, las nociones de tiempo y de espacio que son formas de nuestra sensibilidad. Con el entendimeinto, que también tiene sus formas o «categorías», damos forma y relacionamos las impresiones de la sensibilidad. Con la razón llegamos a ideas generales universales, más allá de los datos ordenados acerca de las cosas en sí; y sólo es tendencia hacia el imposible de penetrar más allá de la experiencia. Ciertas nociones son «a priori», o sea admitidas sin necesidad de experiencia y entre ellas está la «causalidad».

En esa época, los excesos especulativos del «idealismo alemán» de FICHTE, de SCHELLING o HEGEL, con su «filosofía de la naturaleza» propuesta en sustitución de la ciencia, no hicieron sino agravar el divorcio entre ciencia y filosofía, haciendo caso omiso de la epistemología de KANT, que podría haberlas unido.

Como reacción a este idealismo especulativo del siglo XIX, volvió a asomarse un materialismo realista de corte primitivo, con absoluta unidad entre el mundo real y las

impresiones sensoriales; pero surgió sobre todo la reacción del positivismo de COMTE, que limitó el conocimiento humano a la relación entre fenómenos, huyendo de toda metafísica, de toda búsqueda del absoluto, y hasta de una concepción inteligible del mundo. «*Nuestros estudios reales*» dice COMTE «*están circunscriptos estrictamente al análisis de los fenómenos, para descubrir sus leyes efectivas y no pueden, de manera alguna, estar relacionados con su modo esencial de producción... Toda hipótesis física, para ser realmente apreciable, debe limitar su alcance a las leyes de los fenómenos y no a su modo de producción...*» La misión de las ciencias físico-naturales consistiría pues en establecer el orden de los fenómenos dentro del tiempo y del espacio como «hechos generales», absteniéndose de toda metafísica, de toda especulación y «a priori». Según COMTE, se debe hacer una clasificación de las ciencias de la más simple hasta la más compuesta, de la matemática a la sociología, y se debe hacer una filosofía de la historia.

Pero el positivismo imponía al espíritu tales prohibiciones de evasión hacia todo lo que no fuera investigación estrictamente positiva, que se oponía terminantemente al estudio espectral de la constitución de los astros, a los estudios sobre constitución de la materia y aun, a las observaciones microscópicas.

Los empiristas ingleses como MILL, el evolucionista SPENCER, y el pragmatista JAMES se encuentran cercanos a ese positivismo, por lo menos en cuanto a su negación de la metafísica, del apriorismo y de una concepción exacta de la imagen del mundo.

Sin embargo, este anhelo de la imagen de la estructura del mundo es natural al hombre y la ciencia; siempre ha de volver a buscar un camino hacia ella, pero un camino distinto al que señale o elija la metafísica, aunque, como lo afirma MEYERSON, «*el hombre hace metafísica como respira, sin quererlo, sin darse cuenta de ello*».

La Termodinámica, con sus nuevos conceptos sobre la sustancia misma del mundo exterior (energía en lugar de materia) provocados por sus dos principios fundamenta-

les (conservación de la energía y aumento de la entropía) volvió a provocar el acercamiento entre ciencia y filosofía y, sin duda, volvió a dar libre curso al «mínimum de metafísica» de que la ciencia no puede desprenderse.

2

ENERGÉTICA Y MECANISMO

Rankine — Mach

En el primer momento se consideró que el descubrimiento de MAYER ratificaba terminantemente la doctrina mecanista del calor-movimiento. Los físico-matemáticos, por su lado, no atribuían mucho valor a la imagen mecánica hipotética de un calor-movimiento real de partecillas, pues la consideraban superflua, ya que se daban por satisfechos con las ecuaciones de la Termodinámica, cuyos valores numéricos apreciaban más que representaciones figurativas mecánicas o geométricas. Por añadidura, la imaginación de movimientos invisibles y masas ocultas se complicaba más aun al tratarse no ya de una forma determinada y permanente de energía sino de las múltiples formas en que ésta se transforma, de acuerdo con el descubrimiento de MAYER. En cuanto al principio CARNOT-CLAUSIUS, pese a los esfuerzos de MAXWELL, HELMHOLTZ y GIBBS, su explicación mecanista presentaba ingentes dificultades que ubicaba la ciencia frente a una angustiosa encrucijada.

En 1855, RANKINE fundó la doctrina de la Energética, dándole el doble aspecto de crítica negativa de la física mecanista y de crítica constructiva para la edificación de una nueva teoría física, un nuevo método, «energetista».

Partía del principio de que todos los fenómenos físicos no son más que manifestaciones y transformaciones de la energía y que todas las energías y todos los trabajos son homogéneos.

Acusaba al mecanicismo de haber disminuído el valor de la experiencia al dar indebida entidad a la hipótesis, que, por extraña aberración, llegó a tener en el espíritu del físico tanto valor de realidad como aquélla. Prueba de ello fué la oposición al concepto de la transformación de la energía en defensa de la vana hipótesis de la conservación del calórico o de la electricidad, concebidos como flúidos materiales y asimilados así a las propiedades que se atribuían a la materia. Prueba de ello también fué la necesidad de imaginar las artificiosas hipótesis de masas ocultas, movimientos invisibles, pretendiéndose así dar explicaciones mecánicas a fenómenos de energía que no les corresponden. Lejos de atacar la Mecánica en sí, RANKINE la señalaba como ejemplo y modelo para la Física, porque, dentro de su propio dominio, es abstracta, deductiva, matemática, fiel a la experiencia y libre de hipótesis. Pero el mecanicismo es, según él, la extensión abusiva y artificiosa de la Mecánica, fuera de su dominio, a fenómenos que no le incumben.

Proponía entonces RANKINE, en la faz constructiva de su crítica de la física, crear una teoría física que fuera fiel descripción y clasificación de las experiencias, y adoptar un método que fuera perfecto y seguro instrumento de investigación. En su aspecto de pura y simple transcripción de la experiencia, esa física cumpliría con el ideal de NEWTON; en su aspecto de una matemática de todo el universo, también correspondería al ideal racionalista de DESCARTES.

Lo que propuso RANKINE no era pues destruir el pasado y construir de nuevo; era hacer una reforma, una corrección general de actitudes, reaccionando contra las inclinaciones equivocadas. Su energética era experimental, empírica, determinista, deductiva y matemática. Era esencialmente abstracta en el sentido de no dedicarse preferentemente como el mecanismo, al objeto concreto individualmente considerado, sino a buscar el estudio de las propiedades generales y de los conceptos acerca de la energía y de sus formas que comprenden todos los fenómenos físicos. Dentro de la originalidad de la doctrina y de su

nuevo concepto, prescindente de la materia, como superflua, y de la hipótesis, como artificiosas, se descubren numerosos «puentes» que sin cesar la unen con el mismo mecanicismo.

Contrariamente a ciertas críticas, agreguemos que, libre de todo escepticismo, la doctrina de Rankine era fundamentalmente optimista en cuanto al valor en sí de la física y de la ciencia en general.

Aunque hemos señalado a RANKINE como fundador e iniciador del movimiento energetista, podría afirmarse que, en verdad, el concepto energético ya se encontraba en MAYER mismo, quien lo oponía claramente al concepto mecanista, como lo expresó sin lugar a duda OSTWALD al enorgullecerse de seguir las huellas de su gran compatriota. MAYER, en efecto, aunque no llegó a negar la materia, colocaba a su lado la energía como objeto al que sólo diferenciaba de la materia su imponderabilidad. Por otra parte separaba nítidamente una forma de energía de otra, dando tanta importancia a la independencia de cada una de ellas como a la capacidd de transformación de unas en otras.

Prosiguiendo la obra de RANKINE, MACH continuó la defensa de la doctrina energetista por el doble camino de la crítica constructiva hacia la Energética. Su célebre obra *La Mecánica,* publicada en 1903 pero derivada de trabajos iniciados en 1868, y que el autor denomina «explicación crítica animada por un espíritu antimetafísico», desarrolla ampliamente los dos aspecto señalados.

MACH consideraba la ciencia como una creación humana de pensamiento y de imaginación, por consiguiente subjetiva, que, cada vez más amplia y más profunda, se acerca continuamente al objeto siendo pues progresivo y seguro su valor objetivo. El proceso científico, afirma MACH, nos muestra que, después del período de observación experimental seguido inmediatamente por un período intelectual deductivo, llega el período formal, constituído por la creación de imágenes separadas ya de la objetividad, «*medios intelectuales auxiliares que usamos para la representación del mundo en la escena del pensamiento*».

Lo que el hombre busca pues en la ciencia es representarse el universo con «comodidad» intelectual, «ahorrando» esfuerzos, «economizando» inteligencia ante la enorme complejidad objetiva.

Así lo hizo muy bien la Mecánica, dentro de su sector, con los grandes descubrimientos de los siglos XVI y XVII, que liberaron el espíritu científico de la teología... GALILEO, KEPLERO, NEWTON, HUYGHENS...

Luego, como era lógico esperarlo, se quiso aplicar los procedimientos de números, geometría, etc... de la mecánica a todos los fenómenos (ópticos, eléctricos, caloríficos, magnéticos, químicos...); allí nació el período de mecanismo, que fué fecundo, pero que debía terminar pues había vivido su período histórico. «La explicación mecánica de todos los fenómenos naturales no es más que un prejuicio de origen histórico», dice MACH; y ANDRADE afirma: «El mecanismo se debe a asociaciones de ideas fortuitas...».

En su crítica del mecanismo, MACH consideraba pues que ya había pasado el tiempo en que, sin derecho ni conveniencia, el estudio de una parte determinada de la física impusiera sus leyes, principios, conceptos y métodos a las demás partes haciendo perder de vista lo general por sumisión a lo parcial, y no resultando de ello ninguna «comodidad» intelectual, ninguna «economía» o «ahorro» del pensamiento sino complicaciones, lagunas e hipótesis artificiosas. «Sólo nos cumple descubrir las dependencias reales de los movimientos de masas, variaciones de temperatura, variaciones de valor de la función potencial, variaciones químicas, sin imaginar nada distinto debajo de esos elementos que son características físicas directa o indirectamente dadas por la observación. Procediendo así en todas las ramas de la física, uno se circunscribe a la expresión cuantitativamente concebible de los hechos, y todas las nociones inútiles y ociosas se eliminan conjuntamente con los pretendidos problemas que se relacionan con ellas.»

MACH demostraba que CARNOT y MAYER obraron dentro del calor tal como GALILEO lo hiciera en Dinámica, es decir sin traducir esos fenómenos caloríficos en fenó-

menos mecánicos. «Aquellos que usan las muletas de los conceptos mecánicos para llegar al reconocimiento de la equivalencia del calor y del trabajo no entienden sino a medias el progreso realizado por este principio».

Así como la Mecánica Geométrica fué un primer período de esa ciencia, seguido luego por la Mecánica Analítica de EULER y LAGRANGE; así, la Física Mecanista fué un período inicial y la Física Energética es su grado superior, aseguraba MACH.

Llegaba así a la conclusión de que, partiendo de la experiencia la ciencia debe alejarse de ella porque su doctrina se sustituye a la experiencia, pero siempre debe buscar en la experiencia la confirmación, ya que si se aleja hacia regiones en que esto le sea imposible, es que se ha desviado donde no le corresponde actuar aún.

HERTZ, el glorioso descubridor de las ondas electromagnéticas, dedicó el último año de su vida, tan prematuramente truncada, al estudio de la mecánica y de la teoría científica. En sus opiniones, coincide en muchos aspectos con las de MACH y también con las de KANT, y establece que las imágenes que nuestro intelecto construye deben satisfacer condiciones de admisibilidad, de exactitud y de conveniencia. Mientras la exactitud está fijada por la experiencia, la admisibilidad está librada a nuestro intelecto y como condición «a priori».

3

OSTWALD. — LA DERROTA DEL ATOMISMO

KIRCHHOFF (1874), HERTZ (1893), y otros desarrollaron y aplicaron las ideas de MACH, pero fué OSTWALD quien, en 1895, reunió las ideas de RANKINE y de MACH en un claro manifiesto de reforma de la ciencia físico - química, cuya sensacional traducción francesa bajo el título de *La derrota del atomismo* provocó un estupor que expresa claramente la violentísima reacción de CORNÚ.

Fué un incidente sensacional que merece ser recordado. El artículo firmado por W. OSTWALD, profesor de física en la Universidad de Leipzig, encabeza el número del 15 de noviembre de 1895 de la *Revue Générale des Sciences* y ocupa cinco páginas.

OSTWALD señala primero que ocurría en aquella época un fenómeno extraño: un completo acuerdo en cuanto a conceptos sobre el mundo exterior. Todos repiten por igual, decía desde el matemático hasta el médico que: «*Todas las cosas están formadas por átomos en movimiento; esos átomos y las fuerzas que obran entre ellos son las realidades últimas de las cuales se componen los fenómenos particulares. Sólo la Mecánica de los átomos puede dar la clave del mundo físico. Materia y movimiento son los dos conceptos a los cuales, en último análisis, deben ser sometidos los fenómenos más complejos*». Esto, exclama OSTWALD, es insostenible, pues esta teoría mecánica no logró sus fines y está en contradicción con verdades universalmente admitidas. «*La teoría mecánica debe ser abandonada por insuficiente y debe ser reemplazada por la que llamaré teoría energética.*»

Todas las leyes naturales, afirmaba OSTWALD, consisten en descubrir un «*invariante*» o sea una magnitud que permanece invariable mientras las otras varían entre los límites posibles y asignados por la ley misma. La historia de la ciencia muestra que todas las ideas científicas están ligadas a esa búsqueda.

La *masa* es una de esas invariantes; de allí vino la idea de materia con todo lo que comprende: peso, volumen, propiedades químicas; y la ley física de conservación de la masa degeneró en axioma metafísico de conservación de la materia, introduciendo en la ciencia una cantidad de elementos hipotéticos. Como ejemplo, critica OSTWALD el «contrasentido» de la explicación de la combinación química con la cual se pretende que en un cuerpo nuevo (combinación) permanecen realmente substancias (componentes) que ya no conservan sus propiedades. Aun con esas hipótesis la teoría mecánica no logra explicar el conjunto de los fenómenos naturales. La materia inerte e invaria-

ble en medio del universo sin cesar variable necesitó otro elemento distinto, expresión de evolución, y GALILEO imaginó la *fuerza* y trajo el invariante de la *pesantez* para la caída de los cuerpos. NEWTON presentó la *atracción universal*, función de distancia, y su éxito hizo pensar en aplicar esa gravitación universal a todos los fenómenos físicos así como a los átomos. «*Fué la idea madre de la teoría mecánica del Universo*», y esta concepción recibió su forma clásica en la idea de la *fórmula universal* debida a LAPLACE, y de la cual podía deducirse, conforme a las leyes mecánicas y un análisis riguroso, todo fenómeno pasado o futuro...

Todo esto, afirma OSTWALD, es absolutamente hipotético y metafísico, pese a nuestra ilusión de exactitud. Ninguna de sus consecuencias pudo jamás ser verificada, como, por ejemplo, la naturaleza mecánica de los fenómenos del calor, radiación, electricidad, magnetismo. Tarde o temprano la experiencia trajo un claro desmentido de esas teorías mecánicas. Y aquí OSTWALD escribió estas líneas que reproducimos *in extenso* pues se relacionan directamente con nuestro estudio anterior de la evolución de las teorías de la naturaleza de la luz. Dice así:

«*La historia de la Óptica nos brinda un notable ejemplo en apoyo de lo que acabo de decir. Mientras la Óptica se limitaba a los fenómenos de reflexión y de refracción, la teoría de la emisión debida a* NEWTON *era suficiente. La teoría de las ondulaciones, otra concepción mecánica imaginada por* HUYGHENS y EULER, *podía competir con ella pero no desalojarla. Pero el descubrimiento de las interferencias y de la polarización dió indiscutible predominio a la teoría de las ondulaciones cuyos principios permitían calcular, por lo menos aproximadamente, los nuevos fenómenos...*»

Sin embargo los días de la teoría de las ondulaciones estaban ya marcados; en nuestra época esta teoría fué enterrada sin ruido para dejar lugar a la teoría electromagnética...»

(Aunque no es nuestro propósito intervenir directamente en el incidente, a cuyo simple relato nos limitare-

mos, debemos recordar al lector que, en nuestro estudio de las teorías de la luz, explicamos que la teoría electromagnética de MAXWELL no se opuso de manera alguna a la teoría ondulatoria de la luz concebida por FRESNEL, sino que la comprendió dentro de su síntesis general de las radiaciones sin hacer hipótesis en cuanto al mecanismo de las ondas. Pero, sigamos leyendo a OSTWALD):

«...*Hagamos la autopsia del cadáver de la teoría de las ondulaciones: la causa de la muerte nos aparecerá evidente; ella pereció por sus partes mecánicas. El éter hipotético, al cual se confiara la tarea de vibrar, debía cumplir con este encargo en condiciones muy dificultosas. Los fenómenos de polarización exigen que las vibraciones sean transversales, es decir, que el éter sea un sólido. Pero, por cálculos de Lord* KELVIN, *resulta que un sólido, constituído como debe serlo el éter, no sería estable y no puede pues tener constitución real. Para evitar a la teoría electromagnética igual suerte, el inmortal* HERTZ, *a quien ella tanto debe, renuncia a ver en ella sino un sistema de seis ecuaciones diferenciales. Esta conclusión habla más poderosamente de lo que yo podría hacerlo, contra todas las tentativas de teoría mecánica probadas anteriormente.*»

Prosiguiendo su crítica del mecanismo y del materialismo muestra diversos aspectos en que encuentra esa doctrina en oposición con la naturaleza y dice: «*Entonces, si debemos renunciar a los átomos, a la Mecánica, ¿qué imagen de la realidad nos quedará? Es que no necesitamos imagen alguna, símbolo alguno... Establecer relaciones entre realidades es decir establecer magnitudes tangibles, medibles, de tal manera que de ellas, dadas, se puedan deducir las otras, ésta es la tarea de la ciencia, y la ciencia no cumple su tarea cuando se satisface con una imagen más o menos hipotética. Sin duda la vía es larga y penosa, pero es la única segura...*».

He aquí, pues, de nuevo, la consigna de tipo claramente positivista: ¡Menos hipótesis, más lógica, más prudencia!

«*La idea de* MAYER», agrega OSTWALD «*era extrañamente sencilla, demasiado sencilla para ser acogida inmediatamente. Más aun, los tres sabios que más hicieron pa-*

ra la defensa de la ley de equivalencia, HELMHOLTZ, CLAUSIUS *y* THOMSON, *le dieron la misma interpretación: creyeron que todas las formas de la energía son, en el fondo, una sola y misma cosa: y es, la energía mecánica. Realizaban así lo más urgente: unir la nueva idea a la teoría mecánica reinante; pero la idea perdía así su principal carácter, el de dejar libertad para cualquiera hipótesis. Nuestras sensaciones sólo forman su concepción del Universo por relaciones de energía ¿por qué intercalar la materia que no podemos percibir? La materia es un invento imperfecto; la única realidad es la energía; es el invariante que gobierna todas las fuerzas físicas. «Si usted recibe un golpe de palo ¿qué siente usted: el palo o su energía?» Todo lo que se explicaba antes con la materia es explicable con la energía; se logra mucho más y se levantan muchas objeciones. La única hipótesis que hacemos sobre la dependencia mutua de las diferentes formas de energía es la ley de conservación; luego, clasificando sus propiedades nos libraremos de toda hipótesis, de las fuerzas, cuya existencia no puede ser demostrada, entre átomos que no podemos ver; sólo trataremos de las cantidades de energía que entran en juego.*

«*Así responderemos*», agregaba OSTWALD, «*al verdadero sentido del llamado de* KIRCHHOFF *tan frecuentemente mal interpretado: ¡a la pretendida explicacción de la Naturaleza sustituid la descripción de los hechos!*»

Era empresa arriesgada, por cierto, atacar así, de frente, el atomismo, aquella idea que, según COURNOT (1), tuvo desde la antigüedad tan extraordinaria fortuna que hace pensar «*que los inventores de la doctrina atomística han caído, de primer intento, ya sobre la misma clave de los fenómenos naturales, ya sobre un concepto que el espíritu humano sugiere inevitablemente.*»

El artículo de OSTWALD provocó reacciones diversas en la misma *Revue Générale;* CORNÚ contestó con violencia e ironía; MARCEL BRILLOUIN con mayor reposo.

(1) Citado por MEYERSON en *Identité et Réalité.*

CORNÚ rechazó, indignado, el ataque de OSTWALD contra «*los esfuerzos de tres siglos para someter la explicación de los fenómenos naturales a las leyes de la Mecánica... con los resultados obtenidos desde* GALILEO, *en esa vía, por* DESCARTES, HUYGHENS, NEWTON, EULER, LAPLACE, FRESNEL, GAUSS, VON HELMHOLTZ...» *Gracias a esa "concepción cartesiana"*», agregaba «*las entidades provisorias creadas con el fin de sintetizar los hechos: el Sonido, la Luz, el Calor, la Electricidad y el Magnetismo vienen poco a poco a ubicarse en el dominio sometido a los axiomas de la Mecánica racional*». En cuanto a la afirmación de OSTWALD acerca de la muerte de la teoría ondulatoria de la luz de FRESNEL, CORNÚ contestó (y lo repetimos para dar una idea aproximada del cariz agresivo de la discusión): «*Estas chanzas (badinage) son de un gusto exquisito; la conclusión se canta con la música de "Mambrú se va a la guerra"*»:

«La teoría ondulatoria ha muerto
Ha muerto y se enterró.
Yo la vi poner en tierra
Por cuatro ecuaciones...»

...«*Felizmente para* HERTZ, *para* MAXWELL *que tuvo la idea de esta bella síntesis electroóptica, felizmente para* FRESNEL *y para el honor de nuestro siglo, nada de eso es cierto. La teoría ondulatoria moderna goza de buena salud y se funda enteramente en dos hechos: propagación por ondas de las conmociones luminosas o eléctricas; trasversalidad del vector que representa en sus menores detalles los fenómenos tan delicados de la Óptica tanto como la inducción en el espacio... Protesto pues con todas mis fuerzas contra la negación burlona de los principios que, desde hace tres siglos, dieron tantas pruebas de su fecundidad y en los cuales,* GREEN, CAUCHY, GAUSS *y* VON HELMHOLTZ *hallaban sus más notables inspiraciones...*».

BRILLOUIN, en el mismo número de la «Revue Générale», defendió con más calma el concepto de materia y

la libertad de crear hipótesis, y refutó más respetuosamente los argumentos de OSTWALD. Defendió así la mayor amplitud del principio de conservación de la materia que del principio de conservación de la masa; defendió las teorías cinéticas de los gases, la teoría de FRESNEL; sostuvo que tampoco puede lograrse un conocimiento objetivo del fenómeno energético, pues todos nuestros conocimientos son objetivos y personales y sólo conocemos nuestra representación del fenómeno. Agregaba BRILLOUIN que no se puede criticar a la gran masa de los hombres porque manejan más fácilmente los fenómenos mecánicos que las abstracciones, si KELVIN, CLAUSIUS o VON HELMHOLTZ, de evidente capacidad de abstracción, encuentran útiles para su propio uso las imágenes mecánicas del mundo. Terminaba BRILLOUIN reconociendo que «*demasiado a menudo la imagen que nos hacemos del mundo es exclusivamente geométrica. Sin ninguna idea dinámica. Debe considerarse, en toda máquina, un mecanismo y la transformación de energía que realiza; los dos puntos de vista merecen igual atención en el estudio de la Naturaleza.*»

OSTWALD, despreciando la violenta refutación de CORNÚ, sólo contestó a BRILLOUIN «*pues*», dijo «*encontrar un adversario tan fino y cortés es siempre agradable aunque haya sido un efecto de contraste el que me hizo notar particularmente y apreciar tanto esas condiciones que honran al escritor y son imprescindibles en una discusión científica realmente fructuosa...*» Destacaba nuevamente en esa respuesta su acusación fundamental de que «*las teorías mecánicas contienen demasiado o demasiado pocos parámetros y así provocan dificultades no debidas al hecho sino a su símbolo*». Agregaba que «*la Energética también imagina símbolos pero, contrariamente a la ciencia anterior, cuida escrupulosamente que esos símbolos no contengan nada más, ni nada menos que los hechos que deben representar.*»

Nos detuvimos, tal vez con exceso, en el recuerdo histórico, y también conceptual, de esa curiosa y sensacional incidencia de 1895, víspera del extraordinario período de

descubrimientos no menos sensacionales (rayos X, radioactividad, electrones...) que debían preceder de inmediato la teoría de la relatividad y la teoría de los cuanta, piedras angulares de la Física Nueva.

Acabamos de ver definirse en MACH y en OSTWALD el método concebido por RANKINE: lo racional deriva del desarrollo de lo experimental; el físico sólo debe describir e interpretar lo que el mundo físico es y no dejar su espíritu especular acerca de lo que podría haber sido. Si nuestras concepciones científicas se alejan de los hechos experimentales no debe ser en forma volitiva y metódica sino en el margen inevitable de la interpretación subjetiva. Es la experiencia que nuevamente debe ratificar la teoría y comprobarla como hecho objetivo. Los energetistas defendían pues el predominio de la lógica sobre la imaginación.

Fuera de esas ideas, que no modifican fundamentalmente las tendencias seguidas en la investigación científica desde el siglo XVI sino que previenen tanto contra digresiones especulativas como contra prejuicios materialistas excesivos, los energetistas mantenían su convicción absoluta de que no deben ser sometidos los capítulos referentes a todas las transformaciones de la energía a la Mecánica y a sus principios, sino que la mecánica debe ser un capítulo dentro del estudio general de los fenómenos físicos y sus principios, aplicaciones particulares de principios generales.

OSTWALD defendía un monismo basado en la energía y no en la materia, contrario a la dualidad energía-materia, relegando esta última a la posición de caso especial de los fenómenos energéticos. Por otra parte, daba a la energía un valor de sustancia por mantenerse cuantitativamente invariable, pese a todos los cambios de forma (mecánica, calorífica, luminosa, magnética, eléctrica, química o, aun, psíquica.).

El continuador de RANKINE, de MACH y de OSTWALD, en la trayectoria energetista, fué PIERRE DUHEM. Su obra «*La Théorie Physique. Son objet. Sa structure*» es la admirable exposición de sus ideas que arrancan todas de su obra anterior: «*Commentaires sur la Thermodynamique*» en que ya trazó el esbozo de una dinámica nueva,

vasto plan científico basado en concepciones abstractas y rigurosamente lógicas a fin de eludir la sumisión de toda la física a la explicación mecánica del Universo.

DUHEM agregó a la obra de RANKINE, MACH y OSTWALD un estudio amplio y filosófico de lo que, dentro de esa misma tendencia energetista antimecanista, debe ser la teoría física y lo que de ella puede esperarse. Como ellos, hizo la crítica negativa del mecanismo y luego la crítica constructiva energética; pero, como historiadores de la ciencia, lo que nos interesa y regocija es ver que fundó su obra y sus convicciones sobre un estudio histórico profundo y que una de sus principales conclusiones fué la necesidad ineludible de edificar toda teoría sobre un estudio crítico de las informaciones brindadas por la historia de la ciencia.

Para DUHEM no hay física, sin teoría física. Y ésta no puede limitarse actualmente a la clasificación de hechos experimentales; debe ampliar la experiencia con hipótesis, a fin de construir, no un pretencioso mecanismo explicativo del Universo, sino una estructura de principios coordinados de los cuales puedan deducirse los distintos aspectos del Universo. Esa física teórica no explica, pues, pero describe. No se limita al simple reconocimiento de movimientos locales y equilibrios estáticos sino que ve en la palabra «movimiento» el amplio sentido de todas las modificaciones de la energía y en equilibrio los equilibrios térmicos, químicos, eléctricos, magnéticos, tanto como los mecánicos.

Dijo así: «*Una teoría física no es una explicación; es un sistema de proposiciones matemáticas cuyo fin es representar, tan simple, completa y exactamente como sea posible, un conjunto de leyes experimentales.*»

Dijo de su fe energetista, E. PICARD: «*La energética pura, tal como la entendía* DUHEM, *es una ciencia austera, arropada en sus símbolos, no permitiéndose ni imagen, ni modelo; es una ciencia de algebrista. Desde este punto de vista él fué rigurosamente energetista.*»

Frente a los triunfos que el mecanismo y sus modelos e imágenes reclaman para sí, DUHEM pretendía demostrar

históricamente que, en muchos casos, estas afirmaciones eran ilusiones o engaños, y que una teoría abstracta frecuentemente precedió e inspiró la creación de la imagen hipotética. Enfrentaba, en fin, a esos triunfos lo que la Termodinámica abstracta hizo obtener por GIBBS o por VAN'T HOFF. No creía pues en lo que llamaba «*la opinión vulgar según la cual el abandono de la preocupación lógica y la sustitución de modelos a las deducciones rigurosamente encadenadas aseguran a las investigaciones del físico una flexibilidad y una libertad eminentemente fecundas.*»

Defiende «*la legitimidad, la necesidad y la preeminencia de las teorías abstractas, lógicamente coordinadas*» en oposición a la creencia en la posibilidad de «*simbolizar varios grupos distintos de leyes experimentales o un grupo único de leyes, por medio de varias teorías que descansan, cada una, sobre hipótesis inconciliables con las hipótesis que soportan a las otras*» Teme el criterio de POINCARÉ según el cual «*Dos teorías contradictorias pueden, en efecto, y siempre que no se mezclen y que no se busque allí el fondo de las cosas, ser útiles instrumentos de investigación*». Para él: «*Todo físico aspira naturalmente a la unidad de la ciencia, y todos los que son capaces de meditar y tomar conciencia de sus propios pensamientos sienten la aspiración imposible de abogar, hacia la unidad lógica de la teoría física*» considerada como «*clasificación natural de las leyes físicas.*» Y agrega: «*Los espíritus adaptados a la concepción de ideas abstractas, a la formación de juicios generales, a la construcción de deducciones rigurosas, pero fáciles de extraviarse en un conjunto algo complicado, encontrarán una teoría tanto más satisfactoria, tanto más económica cuanto su orden sea más perfecto, su unidad menos quebrada por lagunas y contradicciones...*»

He aquí pues la posición de los energetistas frente a los mecanicistas en la última década del siglo XIX y los albores del siglo XX... He aquí el incidente, la querella, que, muy pronto, la marcha de la ciencia y el alud de los descubrimientos vino a acallar, dando en verdad, el triunfo al me-

canismo. Como simple indicio de ello, baste recordar que, en 1912, OSTWALD proclamaba el indiscutible triunfo del atomismo.

ENRIQUE POINCARÉ, el introductor del pragmatismo en la ciencia aunque puro intelectualista, contribuyó en forma eficaz y amplia a demostrar en su crítica de la matemática y de las ciencias físico-químicas que el mecanismo de la primera mitad del siglo XIX adolecía de graves defectos, perfectamente señalados por los energetistas, pero que la doctrina de éstos no debía destruir la ciencia clásica sino agregar a su lado como principios de distinto origen y de distintas extensiones , los principios fundamentales de la termodinámica. Proclamó asimismo que, siguiéndose la línea iniciada por la ciencia clásica, «*la ciencia se acerca a la unidad*» que es «*condición necesaria de su posibilidad*», y que cumple con un fin explicativo objetivo aunque no tan absoluto como se pretendía en el siglo XVIII.

No es aquí el lugar de recordar la vasta obra de divulgación realizada por POINCARÉ, además de su profunda labor de Física Matemática. Es por todos bien conocida; en toda ella se destaca su maestría en la crítica y en el análisis resultante de la penetración de su visión y de la profundidad de su erudición matemática.

POINCARÉ admitía la naturaleza figurativa de la ciencia, tan típica del mecanismo, pues consideraba que, detrás de las imágenes con que intentamos figurarnos los mecanismos de la naturaleza, actúan con independencia de ellas, las relaciones abstractas entre los invariantes. En esto radica lo que la experiencia y la ciencia nos permiten alcanzar, ya que son inaccesibles las verdades absolutas, las causas primeras o el mecanismo verdadero de la realidad física. Las posibilidades de representaciones figurativas de esos mecanismos son innumerables; sería un error mantenerse fiel a una de ellas como si fuera realidad. En Óptica existen muchas soluciones posibles que satisfacen igualmente a las condiciones expresadas por las ecuaciones. Lo que resulta fecundo es la comparación entre todas las imágenes figurativas. «*Poco nos importa que el éter exista*

realmente, esto es asunto de metafísicos; lo esencial es que todo ocurre como si existiera y que la hipótesis es cómoda...» Y agrega más tarde: *«Todas esas hipótesis sólo desempeñan un papel secundario. Podría yo haberlas sacrificado; no lo hice porque la exposición perdería en claridad»*

¿Tuvo razón en su oposición al mecanismo la Energética? ¿Logró alguno de sus fines? Esa crisis que provocó en las postrimerías del siglo XIX ¿no surtió efecto alguno?

El valor crítico del energetismo consiste en grandes aportes a la evolución de la epistemología, y bien sabemos que la física actual es fundamentalmente epistemológica.

En cuanto al método científico, y a la doctrina que proponían los energetistas, en verdad no tuvieron éxito alguno y resultaron estériles, por lo menos en este período de la historia de la ciencia.

Sería aventurado afirmar que, en alguna época futura, no vuelvan a presentarse argumentos similares a los de los energetistas o sea una nueva defensa de una ciencia abstracta y formal, ordenadora y clasificadora de hechos, desprovista de representaciones y subjetiva en cuanto al concepto del conocimiento.

Hemos visto, en este mismo libro, al tratar las nuevas teorías acerca de la naturaleza de la luz, como el gran enemigo del energetismo, el atomismo, triunfó ampliamente en esta Física Nueva del siglo XX. OSTWALD mismo, el apasionado autor de *La derrota del Atomismo* (1), reconoció la amplia victoria experimental del concepto atómico, ya a principios de este siglo.

El serio argumento energetista de la irreversibilidad absoluta de los fenómenos caloríficos establecida por el principio de CARNOT desapareció como lo vimos anteriormen-

(1) Confieso que siento ciertos reparos en usar esta expresión algo efectista del autor de *La derrota del Atomismo* para designar a OSTWALD pues, como historiador, debo hacer constar que este título agresivo de su célebre artículo no le pertenece. Fué obra de su traductor, el profesor LAMOTTE. OSTWALD sólo deseaba llamar su trabajo: *Reforma de la Física General.*

te, ante el triunfo de la teoría cinética de los gases elaborada por MAXWELL, BOLTZMANN y GIBBS, que permitió la explicación mecanista del hecho, con la perfecta distribución de la energía y gracias al concepto estadístico. La lógica imagen del «demonio de MAXWELL» demostró que esa irreversibilidad era sólo un resultado de probabilidades que, lógicamente la naturaleza podría contradecir. Y la naturaleza, en efecto, lo contradice; pues, en el movimiento browniano, en su estudio moderno iniciado por BOLTZMANN, BROWN, GOUY, PERRIN y continuado por EINSTEIN, demostró obrar en forma opuesta, o sea que, ante un número menor de partículas, no dió lugar a la aplicación de las soluciones estadísticas correspondientes a grandes números.

Ya allí surgía la dualidad entre lo microscópico y lo macroscópico.

Reconciliada pues con la mecánica, comprendida dentro de una explicación cinética molecular, el principio de CARNOT-CLAUSIUS se volvió una ley estadística.

Y el concepto general del calor perdió su aspecto de «forma cualitativa de energía» para no ser más que conjunto de condiciones cinéticas que nuestros sentidos perciben de una manera característica.

Con el triunfo de la teoría cinética de los gases, o más bien de la teoría cinética de la materia toda, se sellaba la victoria del calor-movimiento, concepto que los puros energetistas consideraban como una deducción mecanicista equivocada de los principios de la Termodinámica, y hacia el cual se habían inclinado decididamente el mismo RANKINE, JOULE, HELMHOLTZ, KELVIN, etc. . . .

Basta recordar para fijar bien en nuestra imaginación estas dos corrientes divergentes de los grandes cultores de la Termodinámica, estas palabras de OSTWALD: «*Dos caminos se presentaban. . . Uno de ellos lo adoptaron* HELMHOLTZ, JOULE *y la pléyade de sabios que siguieron sus huellas. Consistía en extender el antiguo concepto mecanista a los dominios no mecánicos. El otro camino lo adoptó* ROBERTO MAYER. *Consistía en considerar los fenómenos*

mecánicos como un caso particular de las transformaciones generales de la energía, sometidas todas a la ley de conservación... Frente al concepto mecanista, el concepto energético de MAYER *se funda esencialmente en la noción de energía... Debe considerarse a* MAYER, *pues, como el primero de los energetistas, pero, por el contrario, no puede considerarse como energetista el hombre a quien la ciencia de la energética debe su nombre, pues, aunque igual que* MAYER, *pretendía comprender en su trabajo todo el conjunto de la física y la química, se distinguió de* MAYER, *y en su propia desventaja, en que se mantuvo en absoluto dentro de la hipótesis mecanista de* JOULE *y* HELMHOLTZ...»

Estas dos posiciones, ambas termodinámicas, pero una mecanista y otra energética, quedan simbolizadas también en dos expresiones, una de KELVIN, la otra de PIERRE CURIE. Mientras el primero decía «*Si yo puedo hacer un modelo mecánico, comprendo; mientras no pueda hacer un modelo mecánico, no comprendo...*», el segundo afirmaba: «*Yo veo la energía*».

4

EL NUEVO MECANISMO

El mecanismo triunfó. Con su triunfo se esfumaron los grandes problemas filosóficos edificados sobre la interpretación energetista del segundo principio de la Termodinámica: degradación de la energía, creación inicial y destrucción final del Universo.

El mecanismo triunfó... Sin embargo, es imposible decir que nuestra Física actual ha mantenido y reconocido ciegamente el gobierno de aquel régimen mecanista que el energetismo criticó, tal vez con excesiva violencia y con un rigorismo científico demasiado puritano, pero no sin fuertes razones en muchos aspectos.

En la primera parte de este libro, en el estudio de la evolución de las teorías acerca de la naturaleza de la luz, hemos tratado de levantar un tanto el velo tras el cual se ocultan los misterios de la Física Nueva.

No volveremos a decir aquí nuestro asombro, nuestra admiración, nuestra angustia... y nuestra fe.

Las teorías de la relatividad y de los cuanta, grandes creadoras de la Física Nueva, así como la teoría de los electrones, la estadística, la mecánica ondulatoria o la mecánica de los cuanta, modificaron profundamente la metodología y, como ya lo dijimos, el mismo «espíritu científico».

El mecanismo o mecanicismo del siglo XX que se suele llamar «eléctrico» o «electromagnético», para diferenciarlo mejor, no es por cierto, el mismo mecanismo clásico de los siglos XVII y XVIII, vivo aún a mediados del siglo XIX. Las diferencias son evidentes aunque también es evidente la continuidad dentro de la evolución y el real progreso de un espíritu científico siempre homogéneo y orgánico, pese a esas crisis evolutivas.

Como conclusión de esta rápida visión del movimiento energético en su lucha contra el mecanismo de la segunda mitad del siglo XIX, podrían referirse estas palabras de ABEL REY: «*Se puede decir que ese movimiento dió todo lo que podía dar desde el punto de vista científico. Nos puso en guardia contra una tradición que había oprimido pesadamente la física de la segunda mitad del siglo* XIX. *Evitó a esa ciencia la tendencia instintiva hacia la "escolástica" que derivó claramente de la "escuela", es decir de las necesidades de la enseñanza, las cuales tienden siempre y en todas partes a la cristalización.*»

Deseamos que este librito nuestro, con sus modestas aspiraciones de divulgación, con su rápido viaje a través de la evolución de conceptos acerca de la luz y del calor, sea para algunos de nuestros colegas educadores, un simple estímulo para que se empeñen en escapar a esa fatal tendencia de la enseñanza: la «cristalización»...

BIBLIOGRAFÍA

Histoire de la Physique, POGGENDORFF. (Dunod, París, 1883).

Historia de la Ciencia, DAMPIER DAMPIER WHETHAM. (Aguilar, Madrid, 1931).

Historia de la Física, P. F. SCHURMANN (Montevideo, Anales de la Universidad, 1937. — 2ª edición. Edit. Nova. Buenos Aires, 1946).

Geschichte der Optik, E. HOPPE. (Weber, Leipzig).

Histoire de la Physique, E. HOPPE. (París, Payot, 1932).

Oeuvres Complètes de Christian Huygens, publiées par la Société Hollandaise des Sciences. (La Haya, Martinus Nijhoff. Tomo I, 1888, tomo XIX, 1937. *Traité de la Lumière*, tomo XIX).

Traité de la Lumière, CHRISTIAN HUYGHENS. (París, Gauthier Villars, 1920).

Oeuvres de Descartes, publiées par Ch. Adam et Paul Tannery. (París, Léopold Cerf. Tomo I, 1897, tomo XI, 1909. — *La Dioptrique*, tomo VI, 1902).

Oeuvres de Fermat, publiées par Paul Tannery et Charles Henry. (París, Gauthier Villars. Tomo I, 1891, tomo IV, 1912).

Isaaci Newtoni Opera. Comentariis illustrabat Samuel Horsley. (Londres, Joannes Nichols. Tomo I, 1779, tomo V, 1785. — *Optics*, tomo IV, 1782).

Le Vrai Système de Physique Générale de M. Isaac Newton, exposé et analysé en parallèle avec celui de Descartes, par le R. P. Louis Castel. (París, Claude Francçois Simon, 1743).

Oeuvres Complètes d'Augustin Fresnel, publiées par H. de Sénarmont, Emile Verdet et Léonor Fresnel. (París, Imprimerie Impériale. Tomo I, 1866, tomo III, 1870. Introduction de E. Verdet).

Eléments de la Théorie Electromagnétique, L. SILBERSTEIN. (París, Gauthier Villars, 1923).

Les Electrons, SIR W. BRAGG. (Revue Scientifique, 1922).

Nuevas Concepciones de la Materia, C. G. DARWIN. (Madrid, Aguilar, 1936).

The Endless Quest, F. W. WESTAWAY. (Londres, Blackie and Sons, 1936).

La Física Moderna, CASTELFRANCHI. (Barcelona, Gili, 1930).

Átomos y Cosmos, HANS REICHENBACH. (Madrid, Occidente, 1931).

La Física del Átomo, ARTHUR MARCH. (Madrid, Occidente, 1934).

La Física Contemporánea en sus Relaciones con la Filosofía de la Razón Pura, S. M. NEUSCHLOSZ. (Rosario, 1937).

La Physique Moderne et l'electron, M. A. BOUTARIC ALCAN. (París, 1935).

L'Ancienne et la Nouvelle Théorie des Quanta, EUGÈNE BLOCH. (París, Hermann, 1930).

Les Atomes de Lumière et les Quanta, EUGÈNE BLOCH. (París, Hermann, 1930).

Grains de Matiére et de Lumière, JEAN PERRIN. (París, Hermann, 1935).

Gravitation, Lumière, Electromagnétisme, EMILE SEVIN. (París, Dunod, 1934).

La Structure des Nouvelles Théories Physiques, GUSTAVE JUVET. (París, Alcan, 1933).

Un coup d'œil sur l'Histoire des Sciences et des Théories Physique, EMILE PICARD. (París, Villars, 1930).

La Physique de 1914 à 1926, D. O. CHWOLSON. (París, Hermann, 1927).

Sur la Nature de la Lumière, CH. PAPANASTASSIOU. París, Jouve, 1935).

Une Nouvelle Conception de la Lumière, LOUIS DE BROGLIE. (París, Hermann, 1934).

La Crise Récente de l'Optique Ondulatoire, LOUIS DE BROGLIE. (París, Hermann, 1930).

Ondes et Mouvements, L. DE BROGLIE. (París, Gauthier Villars, 1926).

La Mécanique Ondulatoire, L. DE BROGLIE. (París, Gauthier Villars, 1928).

La Physique Nouvelle et les Quanta, L. DE BROGLIE. (Revue Scientifique, enero 15 de 1937).

Matière et Lumière. L. DE BBOGLIE. (París, Albin Michel, 1937).

Vie et Transmutation des Atomes, JEAN THIBAUD (Albin Michel, París, 1937).

Four lectures on Wave Mechanics, E. SCHRÖDINGER. (Londres, Blackie, 1928).

El Misterioso Universo, SIR JAMES JEANS. (Buenos Aires, Poblet, 1933).

Les Sciences au XX^e Siècle, ROSTAND, BOUTARIC et SERGESCU. (París, Denoël, Steele).

De l'explication dans les Sciences. E. MEYERSON. (París, Payot).

Religión y Ciencia, BERTRAND RUSSELL. (Santiago de Chile, Zigzag).

Les Principes de la Physique, N. R. CAMPBELL. (París, Alcan, 1923).

Déterminisme et Probabilité, G. CASTELNUOVO. (Scientia, 1, I, 1933).

L'ébranlement du principe de causalité dans la nouvelle physique, K. SAPPER. (Scientia, 1, IX, 1935).

L'état actuel du problème et la notion de déterminisme dans les sciences de la nature, J. METALLMANN. (Scientia, I, VII, 1936).

Le principe de causalité, G. CASTELNUOVO. (Scientia, I, VIII, 1936).

Atoms, Men and Stars, ROGERS D. RUSK, 1938.

Physics of the Twentieth Century, PASCUAL JORDÁN, 1944.

Histoire de la Physique, E. HOPPE. (París, Payot, 1928).

Les Grands Hommes, W. OSTWALD. (París, Flammarion, 1912).

La Energía, W. OSTWALD. (Madrid, Ruiz, 1911).

L'Oeuvre Scientifique de Sadi Carnot, E. ARIÈS. (París, Payot, 1921).

La Dégradation de l'Energie, BRUNHES. (París, Flammarion).

Deutscher Physiker und Chemiker, A. KISTNER. (Munich, Kofel, fchen, 1908).

Calor-Movimiento, TYNDALL. (Barcelona, Progreso Científico, 1886).

Lectures on Some Recent Advances in Physical Sciences, P. J. TAIT. (Londres, Macmillan, 1876. Edición Francesa: París, Fetscherin, 1886).

Matter and Energy, F. SODDY. (Londres, Williams and Norgate, 1920).

The Endless Quest, F. W. WESTAWAY. (Londres, Blackie, 1936).

Esquisse Historique de la Théorie Dynamique de la Chaleur, P. J. TAIT. (París, 1870).

Thermodynamique, MOUTIER. (París, 1885).

The Discovery of the Law of Conservation of Energy, G. SARTON. (Isis, N° 40, vol. XIII, setiembre 1929).

La chaleur et le froid, A. BOUTARIC. (París, Flammarion, 1937).

Les Sciences physico-chimiques et mathématiques, G. MATISSE. (París, Payot, 1925).

ÍNDICE ALFABÉTICO DE AUTORES CITADOS

Alembert (D'), 205.
Al Hazen, 32, 36, 38 y 40.
Ampère, 82, 86, 108 y 170.
Anderson, 92 y 157.
Andrade, 210.
Arago, 40, 46, 47, 70, 72, 80, 81 y 82.
Ariès, 173 y 183.
Aristóteles, 14, 18, 31, 37, 113, 143 y 167.
Arquímedes, 113.
Arrhenius, 92.
Aston, 92.

Bacon F., 17, 167 y 203.
Bacon R., 32 y 167.
Balmer, 116 y 118.
Barrow, 50.
Bartholin, 62.
Bauer, 187.
Becker, 92.
Berkeley, 204.
Bernoulli D., 168.
Bernoulli J., 64, 66 y 168.
Bertrand, 173 y 196.
Biot, 70, 71, 72, 73 y 80.
Boerhaave, 169.
Bohr, 92, 95, 114, 120, 121, 124, 127, 132, 135, 141, 152, 155 y 156.
Bollstaedt, 32.
Boltzmann, 108, 109, 138, 150, 152, 158, 199, 200, 201 y 223.
Bordeaux, 173 y 183.
Borel, 150.
Born, 126, 135, 138 y 147.
Bose, 138, 158, 159 y 200.
Bothe, 92.
Bouasse, 20.
Boussinescq, 173.
Boyle, 50, 56 y 167.
Bradley, 42.
Brewster, 70, 71, 72, 73 y 80.
Brillouin, 215, 216 y 217.
Brown, 200 y 223.
Bruhnes, 173 y 183.
Brunet, 15.
Bunsen, 188.

Campbell, 107.
Carnot (Sadi), 40, 172, 173, 176, 177, 178, 179, 180, 183, 184, 188, 193, 200, 203, 207, 210, 222 y 223.
Cassini, Domingo, 48.
Cauchy, 79 y 216.
Cavendish, 40 y 87.
Clapeyron, 194.
Clausius, 173, 174, 188, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 203, 207, 215, 217 y 223.
Cleomedio, 37.
Clerselier, 45.
Colding, 176, 181, 182 y 184.
Comte, 14, 143 y 206.
Compton, 92, 122, 123, 134, 147 y 154.
Condillac, 205.
Copérnico, 203.

Cornú, 29, 36, 54, 55, 168, 211, 215, 216 y 217.
Cotton, 90 y 92.
Coulomb, 40, 116 y 182.
Cournot, 215.
Crawford, 168 y 170.
Crisipo, 43.
Crookes, 92.
Curie, 92 y 224.

Chadwick, 92.
Chwolson, 110 y 173.

Dacos, 92.
Dampier, 173.
Darrow, 152.
Davisson, 133.
Davy, 85, 169, 170, 176, 177 y 184.
De Broglie Luis, 26, 92, 107, 126, 132, 133, 134, 135, 138, 147, 148, 153, 154, 155, 156, 159, 160 y 166.
De Broglie Maur., 92, 106 y 126.
Demócrito, 30, 36, 110, 136, 137, 143, 203 y 204.
Descartes, 17, 33, 36, 44, 45, 47, 49, 50, 54, 57, 58, 66, 74, 82, 122, 143, 167, 175, 176, 187, 203, 204, 205, 208 y 216.
Dingle, 151.
Dirac, 63, 126, 128, 130, 132, 135, 138, 154, 156, 157, 158 y 159.
Doppler, 63.
Drude, 92.
Dubois-Reymond, 137 y 174.
Duhem, 17, 170, 173, 218 y 219.
Dühring, 192.
Dumas, 173 y 180.
Du Mond, 92.

Ebert, 99.
Eddington, 150, 151, 198 y 199.
Einstein, 17, 18, 20, 27, 63, 103, 104, 105, 106, 111, 114, 118, 119, 120, 121, 122, 124, 133, 135, 138, 141, 142, 148, 151, 158, 159, 200 y 223.
Elster, 92.
Empédocles, 30.
Epicuro, 30.
Epstein, 121.
Espinoza, 143 y 204.
Estratón de Lámpsaco, 18.
Euclides, 30 y 37.
Euler, 44, 64, 65, 66, 67, 74, 128, 168, 211, 213 y 216.

Faraday, 75, 82, 84, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 98, 102, 107, 127, 176, 177, 180 y 184.
Fermat, 41, 44, 45, 54, 58 y 128.
Fermi, 138, 158, 159 y 200.
Fichle, 205.
Filopón de Alejandría, 43.
Fizeau, 34, 35 y 82.
Fletcher, 92.
Foucault, 45 y 59.
Fourier, 171.
Franklin, 92, 93 y 171.
Fraunhofer, 70.
Fresnel, 46, 47, 56, 59, 60, 63, 65, 67, 70, 72, 73, 83, 84, 86, 89, 90, 95, 96, 98, 101, 102, 119, 124, 132, 156, 165, 214, 216 y 217.

Galileo, 15, 16, 17, 18, 33, 34, 35, 45, 48, 49, 124, 167, 203, 210, 213 y 216.
García de Zúñiga, 21.
Gassendi, 36 y 203.
Gauss, 216.
Gay Lussac, 72 y 191.
Geitel, 92.
Germer, 133.

Gibbs, 138, 150, 207, 220 y 223.
Giese, 92.
Golius, 39.
Goudsmith, 92 y 156.
Gouy, 223.
Gravesande, 169.
Green, 79 y 216.
Gregory, 33.
Grimaldi, 33, 45, 46, 47, 56 y 69.
Grove, 176, 180 y 184.
Guilleminot, 173, 186, 187 y 197.

Halley, 68.
Hallwachs, 99.
Hamilton, 128.
Hauy, 72, 73, 75 y 77.
Hegel, 205.
Heisenberg, 126, 130, 135, 136, 138, 141, 146, 148, 150 y 152.
Helmholtz, 70, 92, 174, 176, 180, 181, 184, 187, 191, 193, 207, 215, 216, 217, 223 y 224.
Herón, 167.
Herschel J., 182.
Hertz, 78, 82, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 98, 99, 100, 101, 113, 211, 214 y 216.
Hirn, 180.
Hittorf, 92.
Hobbes, 203.
Hoefer, 15.
Hooke, 33, 46, 47, 49, 50, 54, 56, 70, 81 y 82.
Hopkins, 188.
Hoppe, 15 y 173.
Hume, 143, 145 y 205.
Huygbens, 34, 39, 40, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 63, 65, 66, 67, 72, 74, 78, 79, 80, 81, 82, 98, 101, 122, 176, 203, 210, 213 y 216.

Ingenhousz, 171.

James, 206.
Janssen, 33.
Jeans, 21, 109, 113, 138, 150, 200 y 201.
Joliot, 92.
Jordan, 89, 126, 128, 135, 136, 141, 142 y 160.
Joule, 173, 174, 176, 181, 182, 183, 184, 191, 193, 223 y 224.
Juvet, 147.

Kant, 143, 205 y 211.
Kaufmann, 92.
Kelvin, 92, 173, 193, 194, 195, 198, 214, 217, 223 y 224.
Keplero, 17, 33, 35, 36, 38, 40, 49, 50, 167, 203 y 210.
Kerr, 90.
Kircher, 33.
Kirchhoff, 108, 211 y 215.
Kistner, 15.
Korteweg, 39.
Krishman, 134.

Lagrange, 20, 68, 124, 128 y 211.
Lamé, 79.
Lamotte, 222.
Langevin, 92, 94, 137, 138, 141 y 157.
Laplace, 70, 71, 72, 137, 144, 152, 169, 213 y 216.
Larmor, 92.
Lavoisier, 169.
Le Dantec, 197 y 199.
Leibniz, 17, 110, 111, 143, 168, 175, 176, 187, 203 y 205.
Lenard, 100 y 101.
Lenz, 187.
Lesage, 82.
Leucipo, 30, 36 y 110.
Lewis, 103.
Liebig, 187.

Lindemann, 92.
Lippershey, 33.
Locke, 143, 204 y 205.
Lorentz, 91, 95, 96, 98, 99, 102, 108 y 156.
Lucrecio, 30.
Lummer, 109.

Mach, 17, 111, 144, 174, 184, 209, 210, 211, 218 y 219.
Malebranche, 204.
Malus, 70, 71, 73 y 80.
Maupertuis, 44, 128 y 205.
Maxwell, 40, 65, 78, 82, 84, 87, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 98, 99, 101, 102, 108, 121, 124, 132, 150, 153, 156, 159, 200, 207, 214, 216 y 223.
Mayer, 40, 173, 174, 176, 177, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 193, 194, 195, 202, 207, 209, 210, 214, 223 y 224.
Metallmann, 152.
Meyerson, 20, 130, 131, 206, y 215.
Miel, 15.
Mill, 144 y 206.
Millikan, 92, 96, 106, 119 y 121.
Mohr, 176, 179, 180 y 184.
Molière, 21.
Montgolfier, 180.
Montucla, 41.
Morólico, 32.
Mouret, 173.
Mousson, 188.
Moutier, 173.
Mouton, 90.
Musschenbroek, 169.

Nernst, 114.
Neumann F., 83.
Newton, 16, 17, 20, 27, 33, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 68, 69, 70, 72, 74, 75, 76, 78, 80, 81, 86, 104, 119, 120, 124, 168, 171, 176, 177, 181, 203, 208, 210, 213 y 216.
Nollet, 168.

Ostwald, 173, 183, 186, 187, 209, 211 y 223.

Painlevé, 20.
Pardies, 53 y 54.
Parrot, 71.
Pauli, 158 y 159.
Pearson, 145.
Peckham, 32.
Perrin, 92, 159 y 223.
Picard E., 94, 183 y 219.
Pitágoras, 29.
Pitoni, 15 y 173.
Planck, 16, 17, 20, 63, 102, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 118, 121, 127, 129, 132, 135, 137, 141, 142, 145, 147 y 165.
Platón, 30, 31, 143 y 166.
Poggendorff, 15, 36, 181, 186, 187 y 196.
Poincaré E., 17, 114, 173, 183, 220 y 221.
Poincaré Luciano, 197.
Poisson, 70, 71, 79 y 80.
Popper, 192.
Porta, 32 y 167.
Pringsheim, 109.
Protágoras, 143.
Ptolemeo, 30, 37, 38 y 40.

Raucan, 134.
Rankine, 198, 199, 207, 208, 209, 211, 218, 219 y 223.
Rayleigh, 87, 109 y 134.
Rey, 15, 123 y 225.
Richarson, 92.
Richards, 92.
Richmann, 171.
Riecke, 92.
Ritz, 116.

Roemer, 33, 47, 48, 49, 50, 52, 53 y 58.
Romieu, 68.
Rumford, 169, 170, 171, 176, 177, 180 y 184.
Rusk, 85 y 113.
Russell, 164.
Rutherford, 87, 92, 115, 116 y 155.

Sarton, 15 y 184.
Saunderson, 74.
Sauveur, 68.
Scheliing, 205.
Schoenbein, 192.
Schrödinger, 126, 130, 131, 132, 135, 138, 156 y 157.
Schwerd, 78.
Seguin, 176, 180 y 184.
Seiffer, 177, 191, 193.
Snellius, 33, 35, 38, 39, 40, 41 y 57.
Sócrates, 31 y 143.
Sonmerfeld, 120, 121 y 155.
Sorge, 68.
Spencer, 206.
Stahl, 168.
Stefan, 108.
Stern, 134.
Stoney, 92.

Tait, 173, 174, 176, 179, 182, 188, 189, 193 y 199.
Tales de Mileto, 15.
Tannery, 14.
Tartini, 68.
Teodorico, 32.
Teofrasto, 14 y 18.
Thibaud, 92.
Thomson B. (v. Rumford).
Thomson J. J., 87, 92, 100, 102, 104, 108, 116, 125, 174 y 215.
Thomson James, 188.
Thomson G. P., 133.
Thomson W. (v. Kelvin).
Townsend, 92.
Tyndall, 134, 173, 177, 182, 183, 184, 189 y 192.

Uhlenbeck, 92 y 156.

Van't Hoff, 220.
Vaz Ferreira, 151.
Verdet, 43, 68, 79 y 173.
Vigny, A. de, 22.
Villard, 92.
Vinci, 32 y 167.
Vitello, 32 y 40.
Voigt, 92.
Vossio, 35 y 39.

Watson, 173.
Weber, 92.
Westaway, 183.
Wiechert, 92.
Wiedemann, 99.
Wien, 108.
Wilson H. A., 92.
Wilson C. T. R., 92.
Wollaston, 70 y 71.

Young, 46, 47, 55, 60, 67, 70, 71, 78, 79, 81, 82, 95, 98 y 170.

Zeeman, 90, 92, 95 y 156.
Zenón, 146.
Zenner, 198.

Este libro se terminó de imprimir el 25 de noviembre de 1946, en las prensas de **Gerónimo J. Pesce y Cía.,** Pedro Goyena 1562/68, Buenos Aires.